

# **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN EL LARGO PLAZO DE UN PUENTE CON ELEMENTOS CONSTRUIDOS CON SECCIONES CON MATERIALES COMPUESTOS**

**MAURICIO RESTREPO CARDONA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**CARLOS ANDRÉS BLANDÓN URIBE**  
**PhD en Ingeniería Sísmica**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA**  
**INGENIERÍA CIVIL**  
**ENVIGADO**

**2013**

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

*Para Marta Lucía Cardona*

*y Jairo Eduardo Restrepo*

## **AGRADECIMIENTOS**

Un agradecimiento para todas las personas que de alguna manera ayudaron a la realización de este trabajo.

Al profesor Carlos Blandón por su buena disposición en la dirección del mismo. A Juan Pablo Bolívar y Santiago Londoño, pertenecientes a Constructora Conconcreto S. A., por el interés prestado y su ayuda.

A la empresa Constructora Conconcreto S. A.; gracias a su gestión se contó con los recursos necesarios para la culminación exitosa del proyecto.

A los profesores que me compartieron sus conocimientos técnicos y humanos. Al personal de la EIA, por su amable ayuda y a mis compañeros que han hecho que el aprendizaje en la institución sea una retroalimentación constante.

A mi familia por el apoyo y acompañamiento en la realización de este trabajo y en general, en toda mi vida académica.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1 PRELIMINARES.....	16
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.1.1 Contexto y caracterización del problema .....	16
1.1.2 Formulación del problema .....	17
1.2 Objetivos del proyecto .....	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
2 MARCO DE REFERENCIA .....	20
2.1 Material compuesto .....	20
2.1.1 Principales características .....	20
2.1.2 Tipos de materiales compuestos .....	21
2.1.3 Fibras de carbono (GFRP) .....	22
2.1.4 Consideraciones económicas de los materiales compuestos .....	25
2.1.5 Impacto ambiental de los materiales compuestos.....	27
2.1.6 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos.....	29
2.2 Sistemas estructurales con materiales compuestos .....	37

2.3	Métodos de diseño y análisis estructural de elementos con materiales compuestos	46
2.3.1	Diseño de elementos tipo viga con materiales compuestos .....	48
2.4	Vigas compuestas .....	50
2.5	Respuesta dinámica de elementos de rigidez constante y masa distribuida .....	51
2.6	Mecanismo de transferencia de cortante .....	52
3	METODOLOGÍA.....	54
4	MODELO NUMÉRICO.....	56
4.1	Descripción del puente de estudio .....	56
4.2	Descripción del modelo del puente .....	58
5	ENSAYOS DE VIBRACIÓN SOBRE EL PUENTE DE SECCIÓN COMPUESTA DE LA EIA	60
5.1.1	Descripción.....	60
5.1.2	Resultados .....	61
6	ENSAYOS DE CARGA SOBRE EL PUENTE DE SECCIÓN COMPUESTA DE LA EIA	63
6.1	Descripción.....	63
6.2	Ensayos de carga en el 2011 .....	64
6.3	Ensayos de carga en el 2013 .....	77
6.3.1	Descarga del puente .....	91
6.4	Análisis de los resultados .....	93

6.4.1	Comparación resultados de ensayos de carga .....	93
6.4.2	Análisis de la rigidez de diseño y la calculada por los ensayos.....	95
6.4.3	Cambios en la estructura.....	97
7	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	100

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 2.1	Propiedades de fibras provenientes del PAN..... 24
Tabla 2.2	Características la matriz de relación esfuerzo – deformación unitaria..... 32
Tabla 2.3	Propiedades de diferentes tipos de cables ..... 39
Tabla 4.1	Propiedades sección compuesta ..... 59
Tabla 5.1	Rigidez a flexión a partir de la frecuencia de vibración ..... 62
Tabla 6.1	Listado de sensores ..... 65
Tabla 6.2	Cargas del ensayo..... 68
Tabla 6.3	Deflexiones medidas en el eje A..... 68
Tabla 6.4	Deflexiones medidas en el eje 2 ..... 68
Tabla 6.5	Deflexiones corregidas del eje A ..... 69
Tabla 6.6	Deflexiones corregidas del eje B ..... 69
Tabla 6.7	Deflexiones de los potenciómetros ..... 70
Tabla 6.8	Deflexiones del modelo ..... 70
Tabla 6.9	Diferencias de los datos medidos con el modelo numérico en el eje A ..... 70
Tabla 6.10	Diferencias de los datos medidos con el modelo numérico en el eje B ..... 71
Tabla 6.11	EI (kN·m <sup>2</sup> ) calculada con datos topográficos ..... 74
Tabla 6.12	EI (kN·m <sup>2</sup> ) calculada con datos de los sensores..... 74

Tabla 6.13	El (kN·m <sup>2</sup> ) calculada con datos del modelo numérico .....	75
Tabla 6.14	Localización de los sensores para el ensayo de carga del 2013.....	78
Tabla 6.15	Cargas impuestas por viga .....	82
Tabla 6.16	Deflexiones con los potenciómetros .....	83
Tabla 6.17	Deflexiones con topografía .....	84
Tabla 6.18	Deflexiones con el modelo numérico .....	84
Tabla 6.19	Diferencia deflexiones con topografía y el modelo numérico .....	85
Tabla 6.20	Diferencia deflexiones con potenciómetros y el modelo numérico .....	85
Tabla 6.21	Rigidez a flexión EI (kN ·m <sup>2</sup> ) con los potenciómetros.....	88
Tabla 6.22	Rigidez a flexión EI (kN ·m <sup>2</sup> ) con el modelo .....	88
Tabla 6.23	Rigidez a flexión EI estimada.....	95
Tabla 6.24	Valores de rigidez del diseño.....	96
Tabla 6.25	Valores de rigidez del modelo numérico .....	96



## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2.1 Proceso de fabricación de la fibra de carbono .....	25
Figura 2.2 Comparación de los costos económicos de puentes con FRP y puentes tradicionales	27
Figura 2.3 Energía requerida de las propuestas de construcción .....	29
Figura 2.4 Estado general de esfuerzos en 3D.....	30
Figura 2.5 Sistema de coordenadas para laminados.....	34
Figura 2.6 Reparaciones en estructuras con barras de CFRP.....	40
Figura 2.7 Vigas con fibra de vidrio del San Patricio Country Bridge .....	42
Figura 2.8 Sección transversal de King Stormwater Bridge .....	43
Figura 2.9 Puente construido por Acciona en España con vigas con FRP.....	44
Figura 2.10 Sección transversal del puente construido por Acciona en España con vigas con FRP	45
Figura 4.1 Puente peatonal de la EIA objeto de estudio .....	56
Figura 4.2 Sección longitudinal del puente .....	57
Figura 4.3 Sección transversal del puente.....	57
Figura 4.4 Detalle de las vigas longitudinales.....	58
Figura 4.5 Detalle de la unión viga losa.....	58
Figura 4.6 Sección transversal de la sección compuesta de la viga .....	59

Figura 5.1	Equipo empleado en los ensayos de vibración .....	60
Figura 5.2	Sensores del ensayo de vibración .....	61
Figura 5.3	Frecuencia de vibración del puente después de los ensayos de carga.....	62
Figura 6.1	<i>Strain gauges</i> en el extremo de la viga .....	64
Figura 6.2	Potenciómetro en el apoyo .....	64
Figura 6.3	Ubicación de los sensores .....	67
Figura 6.4	Rigidez en Estado de carga 1 .....	75
Figura 6.5	Rigidez en Estado de carga 2.....	76
Figura 6.6	Rigidez en Estado de carga 3.....	76
Figura 6.7	Rigidez en Estado de carga 4.....	77
Figura 6.8	Ensayo de carga en el 2013 .....	78
Figura 6.9	Ubicación de los sensores ensayo del 2013 .....	82
Figura 6.10	Deflexiones del potenciómetro 7 durante las etapas de los ensayos.....	83
Figura 6.11	Rigidez para estado de carga 1 .....	88
Figura 6.12	Rigidez para estado de carga 2 .....	89
Figura 6.13	Rigidez para estado de carga 3 .....	89
Figura 6.14	Rigidez para estado de carga 4 .....	90
Figura 6.15	Rigidez respecto a los estados de carga.....	90
Figura 6.16	Comparación rigidez estado de carga 1 .....	93
Figura 6.17	Comparación rigidez estado de carga 2.....	94

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no  
compromete a la EIA.

Figura 6.18	Comparación rigidez estado de carga 3 .....	94
Figura 6.19	Comparación rigidez estado de carga 4 .....	95
Figura 6.20	Oxidación de las barandas.....	97
Figura 6.21	Pérdida del recubrimiento en el centro de la losa.....	98

## **RESUMEN**

Gracias a las propiedades mecánicas como baja densidad, resistencia, rigidez y rápida construcción, los materiales compuestos son una alternativa viable frente a los materiales tradicionales como acero y concreto para proyectos civiles. Sin embargo las estructuras con este tipo de materiales llevan poco tiempo de operación y se presentan algunas dudas sobre la durabilidad y factibilidad en el mercado local.

El presente trabajo analiza las propiedades de un puente peatonal, con un sistema de vigas con materiales compuestos y losa en concreto reforzado, una vez construido y dos años después, expuesto a condiciones ambientales. Para estudiar la evolución del puente y encontrar la rigidez actual, se ejecutaron ensayos de carga y vibración sobre la estructura y se comparó dicha rigidez con las hipótesis de diseño y los ensayos realizados luego de la construcción. Los resultados de los últimos ensayos indican que no hubo un deterioro significativo en las propiedades del puente durante este periodo de exposición y uso.

Palabras clave: Materiales compuestos, ensayos de carga, rigidez y puente peatonal.

## **ABSTRACT**

Thanks to the mechanical properties such as, low density, strength, stiffness and fast construction, composite materials are a viable alternative to traditional materials such as steel and concrete for civil projects. However, structures built with these type materials have been in operation for shorter period of time and there are doubts about the durability and practicality in the local market.

This paper analyzes the properties of a footbridge with a truss system made of composite materials and a slab of reinforced concrete at the time of completion and two years later after being exposed to environmental conditions. In order to study the evolution of the bridge and find the current stiffness, load and vibration tests were executed to the structure and then compared to the stiffness design hypotheses and test performed originally after the construction. The latest test results indicate that no significant deterioration occurred to the bridge properties during this period of exposure and use.

Keywords: Composite materials, load test, stiffness and pedestrian bridge.

## INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha investigado y trabajado en la utilización de materiales compuestos, especialmente las fibras de carbono en la construcción y otros sectores, como el automotor, aeronáutico y deporte. Este material se presenta como alternativa frente a los materiales tradicionales, debido a las múltiples ventajas en términos de propiedades mecánicas como alta resistencia, alto módulo de elasticidad, baja densidad y resistencia a la corrosión. A pesar de que su inversión inicial es alta en comparación con los materiales tradicionales, se han encontrado usos y aplicaciones en la construcción a lo largo de todo el mundo para reforzar y reparar estructuras existentes, como alternativa de cables para puentes atirantados, refuerzo para el concreto, elementos estructurales y estructuras completas con este tipo de material, donde sus características mecánicas y servicios son atractivos y competitivos, además se están investigando nuevos usos y prácticas para disminuir sus costos debido a la alta demanda que posee este material.

Debido a que el uso de los materiales compuestos es relativamente nuevo en la construcción en el mundo y aún más en el ambiente local, se presentan algunas dudas sobre las prestaciones y el nicho de mercado del material, por lo tanto es necesario investigar a fondo sus propiedades, evaluar casos internacionales y comparar los aspectos económicos, ambientales y técnicos donde es preferible usar materiales compuestos a los materiales tradicionales como acero, concreto o la madera.

Un interrogante importante es la durabilidad de los materiales compuestos, ya que a pesar de los estudios que se han realizado, las obras en donde se han utilizado llevan poco tiempo desde que se pusieron en servicio y hay pocos datos reales que demuestren el comportamiento y la durabilidad de la estructura en el largo plazo, en especial la estructura en estudio, la cual fue construida con técnicas y mano de obra local y se encuentra sometida a condiciones ambientales particulares del sitio.

El proyecto tiene como objetivo evaluar el comportamiento de un puente peatonal con elementos contruidos con secciones con materiales compuestos erigido en la EIA realizando pruebas y ensayos de carga dos años después de su construcción con el fin de hacer un seguimiento al comportamiento del material en el tiempo y valorar la viabilidad de estos materiales en la construcción.

En este trabajo se enunciarán las principales características, propiedades, ventajas y desventajas de los materiales compuestos, algunas aplicaciones en el mundo como parte de sistemas estructurales, la metodología y consideraciones de diseño de elementos con materiales compuestos, la descripción, resultados y análisis de ensayos de carga y de vibraciones sobre el puente peatonal para conocer acerca de su durabilidad, y la descripción del modelo numérico que simula el comportamiento del puente.

# 1 PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1.1 Contexto y caracterización del problema

Las obras civiles han estado y seguirán en una constante innovación debido a la necesidad de asegurar una estructura confiable, duradera y estable en el tiempo, resistente a acciones naturales como sismos y huracanes, a las cargas para las que fue diseñada como el peso propio de la estructura y otras cargas superimpuestas. Para mejorar el desempeño de las estructuras, las empresas y la academia se unen en la investigación de nuevos materiales o combinaciones de ellos con el fin de lograr mejorar las características de estas.

Uno de los campos de la investigación y de fuerte desarrollo para aplicaciones en obra civiles es el mejoramiento continuo de estructuras con materiales compuestos y elementos compuestos. En este trabajo de investigación se entenderá el término material compuesto como el material formado por Polímeros Armados con Fibras (FRP), por sus siglas en inglés *Fibre-Reinforced Plastic* y el elemento compuesto como el miembro estructural cuya sección este fabricada a partir de una combinación de materiales que pueden incluir concreto, poliestireno expandido y materiales compuestos tal como se definió anteriormente.

Los FRP se han vuelto conocidos en la construcción gracias a características que los hacen ventajosos frente a materiales tradicionales como el hormigón y el acero. Entre sus propiedades están su poco peso, buenas características mecánicas como resistencia y rigidez, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y al ataque de agentes ambientales, baja conductividad térmica y variedad en forma y tamaño (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja ).

Aunque ya existen varias aplicaciones a nivel mundial de estructuras con elementos compuestos todavía existen varias incógnitas en cuanto a su desempeño en el largo plazo. Es por esto que el monitoreo del comportamiento de las obras civiles contruidas con este tipo de materiales es un aspecto fundamental para evaluar las hipótesis del diseño. Además, es importante evaluar el desempeño de los elementos estructurales a lo largo de la vida útil de la obra cuando se someten a condiciones ambientales como la luz, el oxígeno,



humedad, las variaciones climáticas, entre otros, que pueden afectar el desempeño de la estructura con el tiempo.

Constructora Conconcreto S.A. y la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA) han estado evaluando el desempeño de un sistema estructural para puentes a partir de elementos compuestos laminados con fibra de carbono y matriz. En el año 2011 se construyó un prototipo en las instalaciones de la EIA que consiste en un puente de una luz, simplemente apoyado, con un elemento compuesto conformado por vigas prefabricadas con material compuesto de fibras de carbono y aligeramiento con poliestireno expandido, y tablero construido con losas prefabricadas de concreto reforzado. Una vez finalizada la construcción se realizó una prueba de carga bajo condiciones de servicio. Actualmente existe la necesidad de hacer un seguimiento para poder conocer los efectos de las cargas impuestas y condiciones ambientales en el largo plazo sobre las propiedades mecánicas de la estructura.

### **1.1.2 Formulación del problema**

Debido a que el uso de estos materiales en la construcción, se limita a las últimas décadas, todavía se desconocen muchas de sus propiedades. Especialmente se desconoce el comportamiento y desempeño de las estructuras a lo largo del tiempo. Si se tuviera un conocimiento más amplio, se podrían impedir fallas por resistencia de los materiales o fallas por servicio de la estructura de manera que se garantice una integridad y servicio confiable durante su vida útil. Para avalar dicho comportamiento en el tiempo, es necesario tener un monitoreo continuo de la estructura, las fuerzas que actúan sobre ellas y el comportamiento de los materiales frente a cargas cíclicas y puntuales durante el tiempo.

De acuerdo con las propiedades y ensayos realizados a los FRP, estos tienen resistencia a ataques químicos, humedad, radiación solar, fatiga, cargas dinámicas y cíclicas por lo que se plantea que una de las ventajas sobre los materiales tradicionales es su durabilidad en el tiempo. Sin embargo, las aplicaciones civiles de estos materiales fueron construidas en los últimos años por lo tanto es necesario datos y ensayos en el largo plazo para demostrar la durabilidad de las obras con dichos materiales (Tuakta, 2004).

El desempeño y comportamiento de una estructura se debe evaluar a lo largo de toda su vida útil y no únicamente en su planeación y construcción. El tiempo, las condiciones ambientales y las cargas a las que se ve expuesta una obra afectan características

importantes como la rigidez de los elementos y del sistema, condicionando su seguridad, capacidad y grado de confiabilidad.

Una de las principales limitaciones de los materiales tradicionales en la construcción es su durabilidad en el tiempo debido a la acción de los fenómenos ambientales sobre la estructura y los esfuerzos de fatiga que deterioran las propiedades de los materiales y la seguridad de la estructura. El principal problema que causa este deterioro es la corrosión de los elementos metálicos, incluyendo el refuerzo de acero en el concreto por causa de su agrietamiento, lo que ha llevado al reemplazo o mantenimiento de estructuras en todo el mundo.

Desde hace dos años Constructora Conconcreto S.A. y la EIA trabajan para evaluar la conveniencia de emplear materiales compuestos para la construcción y analizar la evolución de sus propiedades estructurales en el tiempo, debido a que estos materiales se postulan como solución a algunos casos estructurales por sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, pero su respuesta a través del tiempo es un aspecto desconocido si se consideran las condiciones ambientales de humedad, temperatura, técnicas y mano de obra local. Para esto resulta necesario valorar el diseño, uso y comportamiento de los elementos estructurales; realizando pruebas de carga y modelaciones numéricas para cuantificar las propiedades de la estructura y concluir sobre su variación debido al efecto del tiempo dos años después de su construcción.

Si no se conoce con claridad cómo las propiedades de la estructura con materiales compuestos cambia en función del tiempo, se desconoce el comportamiento real de la estructura y su confiabilidad, aspectos que se deben tener en cuenta durante la etapa de diseño. Adicional a esto, el desconocimiento de estos cambios aumentan las probabilidades de falla por estados límites de servicio o estructural y dejan la incertidumbre acerca del momento y la necesidad en que se requieran realizar modificaciones o reparaciones en el sistema estructural.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento bajo carga gravitacional y calibrar el modelo numérico de un puente construido con elementos de secciones compuestas de concreto, fibra de carbono y aligeramiento de poliestireno expandido, considerando el efecto de las cargas externas y el cambio en las propiedades de rigidez, debido a los efectos de flujo plástico y degradación por causa de la exposición ambiental después de dos años de construcción.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los principios de mecánica estructural que rigen el comportamiento a flexión y cortante de los elementos tipo viga de un puente construido con elementos conformados con secciones con materiales compuestos.
- Estimar la rigidez del sistema a partir de sus condiciones de apoyo, geometría, masa, periodo de vibración y mediciones de deflexión bajo niveles de carga determinados.
- Comparar los resultados de ensayos de carga anteriores con los realizados durante este proyecto y determinar variaciones de rigidez del puente.
- Ajustar el modelo numérico y validar las hipótesis de diseño, de acuerdo con los resultados de las mediciones experimentales, de un puente construido con elementos compuestos.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 MATERIAL COMPUESTO

#### 2.1.1 Principales características

Se entiende por material compuesto al material integrado por Polímeros Armados con Fibras (FRP), por sus siglas en inglés *Fibre-Reinforced Plastic* y se caracteriza por estar formado por dos o más materiales constituyentes, adquirir las mejores propiedades de los materiales que lo componen y formar un tercer material. El material compuesto está formado por fibras y una matriz o resina en donde las primeras son las encargadas de aportar las propiedades mecánicas buscadas mientras la segunda se encarga de envolver las fibras configurando geoméricamente el elemento, permitiendo la transmisión de los esfuerzos entre ellas y protegiéndolas química y mecánicamente de daños ambientales. Además los materiales compuestos pueden contar con cargas y aditivos dependiendo de las características del material buscado.

Una de las principales ventajas de los materiales compuestos a nivel de sus propiedades mecánicas, es que al poder diseñar la composición y dirección geométrica de los materiales constituyentes a nivel microscópico, es posible obtener un material con el máximo provecho de las mejores propiedades de las fibras y la matriz e incluso puede adquirir diferentes propiedades de los materiales que lo formaron (Acciona, 2008) .Esto se debe a que a diferencia de la mayoría de materiales utilizados en la construcción, los materiales compuestos son anisotrópicos, es decir, que sus propiedades físicas como el módulo de elasticidad, módulo de cortantes, relación de Poisson entre otros, dependen de la dirección que se considere debido a la disposición microscópica de las fibras y la matriz del elemento. Dicha característica trae como ventaja que el diseño se puede optimizar para que el material trabaje en la dirección de los esfuerzos y no se desperdicie material en zonas donde hay poca concentración de esfuerzos, sin embargo esto trae como consecuencia que la caracterización y descripción del material sea más compleja y se requiera de ensayos y pruebas estandarizadas, de manera que se conozcan las verdaderas propiedades del material y se pueda hacer un análisis estructural confiable.

Las desventajas o limitaciones de los materiales compuestos a nivel general son su poca resistencia al fuego, baja a moderada temperatura de aplicación, en algunos casos es un material frágil y su inversión inicial es alta (Herwig, 2012), sin embargo, esta última

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

desventaja se puede ver compensada por los bajos costos de mantenimiento, por su bajo peso lo hace más competitivo si el costo del proyecto es muy dependiente del peso de la estructura y se pueden reducir los costos por la rapidez en la etapa de construcción al emplear elementos prefabricados.

### **2.1.2 Tipos de materiales compuestos**

Los materiales compuestos con mayor uso son los laminados, donde las principales fibras utilizadas para estos son la fibras de vidrio, aramida y fibras de carbono, también existen mezclas de dos o más fibras para formar otros tipos de materiales compuestos. Debido a que el material compuesto utilizado en las vigas del puente está formado por fibras de carbono, se profundizará más en este tipo de fibras.

Las fibras de vidrio se obtienen de la unión de grandes cantidades de filamentos estirados de vidrio fundido en un horno, para formar cordones o mechas que posteriormente se unirán con una resina para reforzar matrices plásticas. Los dos tipos de vidrio más utilizados en este proceso son los vidrios E que son eléctricos y los vidrios S que poseen alta resistencia, en general las fibras de vidrio poseen un costo económico menor a las fibras de carbono y de aramida y su fabricación es más sencilla pero tienen menor módulo de elasticidad y menor resistencia a la tracción, además poseen las características favorables de buena relación resistencia peso, resistencia a altas y bajas temperaturas y factores ambientales y buena estabilidad dimensional (Smith, 2004).

En la industria de la construcción se utiliza el Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC) principalmente en paneles, fachadas, pantallas anti ruido, cerramiento y decoración arquitectónica; debido a sus propiedades de ligereza, durabilidad, resistencia, aislamiento térmico y acústico que permite mejorar algunas propiedades del concreto dependiendo del uso que se desee, lo que ha demostrado en muchas aplicaciones y ejemplos en todo el mundo. Este material compuesto se elabora con mortero y filamentos de fibra de vidrio álcali resistente con un porcentaje de fibra de vidrio entre 3 % y 5 % aproximadamente (Regás, 2013).

Las fibras de aramida o fibras de poliamida aromática pueden ser de dos tipos, *Kevlar 29* y *Kevlar 49*. La primera se utiliza principalmente en cables y balística debido a su alta resistencia y baja densidad, mientras que la segunda además de tener estas dos características tiene un alto módulo de elasticidad lo que ocasiona que se utilice para aplicaciones aeroespaciales, automoción y en la marina (Smith, 2004).

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Últimamente también se estudia un FRP con fibras provenientes de basalto, un tipo de roca ígnea volcánica, con la ventaja de que no son peligrosos y son amigables con el medio ambiente, igualmente tienen alto módulo de elasticidad y alta resistencia además de tener un costo similar y mejor estabilidad química que la fibra de vidrio tipo E (Wang & Wu, 2010).

### **2.1.3 Fibras de carbono (GFRP)**

Las fibras de carbono son un material orgánico, no metálico, compuesto por arreglos de grafito, que posee propiedades mecánicas únicas. Entre sus principales propiedades se encuentran las siguientes:

- Resistencia mecánica, tenacidad y densidad
- Estabilidad dimensional (logra conservar su forma)
- Amortiguación de vibraciones
- Resistencia a la fatiga y auto-lubricación
- Resistencia química y térmica
- Densidad baja
- Alta conductividad eléctrica
- Compatibilidad biológica

Aunque las propiedades individuales de las fibras de carbono son extraordinarias, muchos beneficios potenciales se esperan cuando se utilizan como refuerzo en materiales compuestos. Inicialmente, por sus altos costos de producción este material era utilizado exclusivamente en la industria espacial; sin embargo, en los últimos años, el costo de producción ha disminuido significativamente lo que ha permitido ampliar su utilización a otras industrias. Actualmente, sectores como el transporte, la construcción, la aeronáutica, los deportes de competencia, entre otros, están investigando las diferentes aplicaciones de las fibras de carbono con el fin de aprovechar al máximo sus propiedades. Específicamente en la industria de la construcción, este material es utilizado en reparaciones e implementado en obras civiles.

Los precursores más importantes de las fibras de carbono son el poliacrilonitrilo y el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase del alquitrán y la celulosa, siendo un copolimero del poliacrilonitrilo el precursor más utilizado actualmente con diámetros entre 5 y 7  $\mu\text{m}$  (Miravete, 2001).

Las principales propiedades mecánicas de las fibras de carbono son su resistencia, módulo de elasticidad y baja densidad. Su alto desempeño frente a cargas cíclicas lo hace un material competitivo en el sector de la construcción ya que es ideal para estructuras con cargas repetitivas donde otros materiales fallan por fatiga. Además, es una alternativa frente a la utilización de elementos metálicos que están expuestos a la corrosión y la ruptura por *Creep* del material (Cristina Barris, 2012). Estos beneficios permitirían disminuir significativamente los gastos y el tiempo de mantenimiento, reemplazo y rehabilitación de estructuras, lo cual minimiza la interrupción de la obra.

En relación con la fibra de vidrio las fibras de carbono tienen mejores propiedades de rigidez y resistencia pero son más costosas, sin embargo por su gran demanda del material y sus altas expectativas en la industria aeroespacial, marina, deportes, automotriz, la construcción entre otras, se espera que su costo económico disminuya.

#### **2.1.3.1 Fabricación**

La fabricación de fibras de carbono se basa en la pirólisis y ciclización de fibras orgánicas. Dependiendo del precursor de fibra, ya sea poliacrilonitrilo, alquitrán o celulosa, varía su proceso de elaboración, sin embargo, en general siguen la misma secuencia.

La secuencia de fabricación comprende los siguientes pasos:

- Estabilización dimensional por medio de un estirado y un horno de oxidación a baja temperatura.
- Carbonización a altas temperaturas para eliminar elementos diferentes del carbón.
- Orientación de los cristales del carbono para mejorar propiedades mecánicas y eléctricas.
- Grafitización a altas temperaturas para incrementar el tamaño de los cristales de carbono.

- Tratamiento de la superficie por medio de una cámara a temperatura constante.

Dependiendo de las temperaturas empleadas, del material y del proceso, se pueden obtener diferentes clases de fibras de carbono donde varía la rigidez, resistencia a la tracción, coeficiente de dilatación, módulo de elasticidad, densidad, costo, etc, entre ellas se encuentran la fibra de alto módulo (HM) la cual requiere más temperatura de tratamiento, la fibra de alta resistencia (HR) tiene la mayor resistencia a tracción y el tipo de fibra III la cual tiene la menor temperatura y es la más barata (Miravete, 2001). Las propiedades de estos tipos de fibras se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Propiedades de fibras provenientes del PAN**

Propiedad	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	Tipo III
Diámetro de hilo (µm)	8	7	7 - 8
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1740-1760	1820	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a la tracción (GPa)	2,6 - 5	2,1 – 2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coeficiente de expansión térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	2,56	2,56	2,56

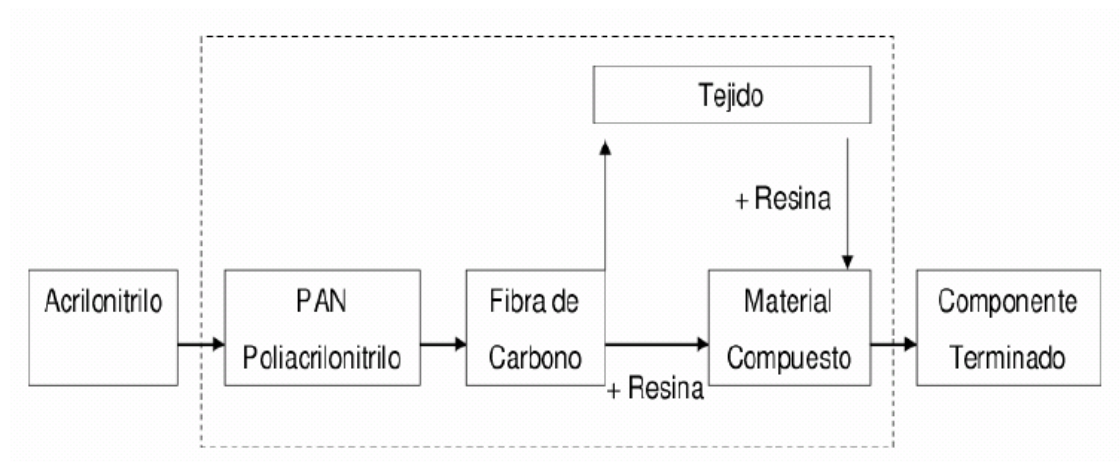
(Cantuta Peralta, 2011)

La fabricación de piezas y elementos con fibras de carbono se clasifica en las técnicas de molde abierto y molde cerrado, en el primero se sobreponen varias capas de tejidos muy  
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



finos de fibra de carbono con adhesivo sobre un molde con capa antiadherente y se realiza la polimerización inyectando resina plástica que permite unir las capas de fibra de carbono y adoptar la forma del molde. Este proceso puede ser con un tratamiento térmico con bolsa de vacío, con una estufa u otros métodos de fabricación. Por otro lado en el método de molde cerrado se utiliza un molde macho y un contra molde hembra con diferentes técnicas que incluye aplicación en vacío y curado térmico, moldeo por transferencia de resina, moldeo por infusión y moldeo por vacío.

En general el moldeo abierto es más utilizado debido a que tiene menores costos económicos y es más sencillo, sin embargo el moldeo cerrado tiene menores impactos ambientales, se puede alcanzar una mayor productividad y se pueden alcanzar formas más complejas. Los procesos de fabricación están en constante investigación para reducir los costos e impactos ambientales y de esta manera fortalecer la competitividad de los materiales compuestos. El proceso de fabricación de elementos con fibra de carbono se muestra en la Figura 2.1.



(Cantuta Peralta, 2011)

**Figura 2.1 Proceso de fabricación de la fibra de carbono**

#### 2.1.4 Consideraciones económicas de los materiales compuestos

Para evaluar el costo económico de una obra civil, es necesario tener en cuenta los costos requeridos durante todas las etapas o ciclo de vida de la obra, desde su concepción, diseño, construcción, mantenimiento y disposición final. Si únicamente se compara el costo inicial

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

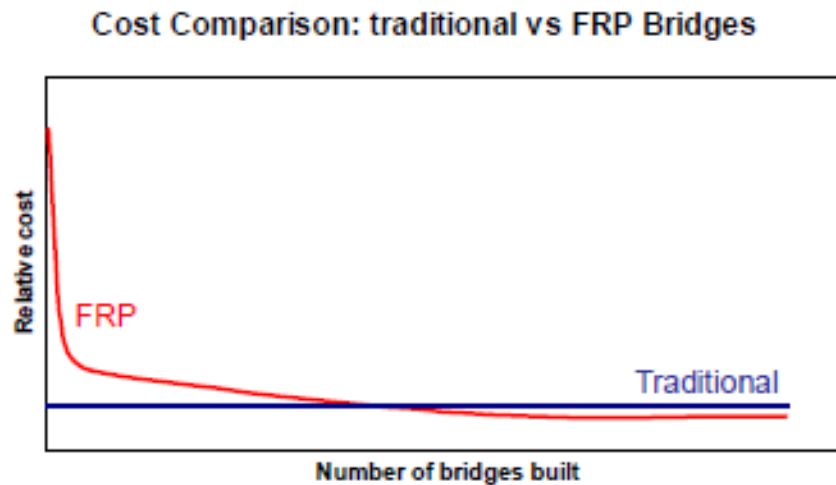
de los materiales tradicionales, como acero y concreto, y el costo de estructuras con materiales compuestos, se daría la impresión que estos últimos no son competitivos desde el punto de vista económico para obras civiles por su elevada inversión inicial en los materiales, sin embargo si se considera y se toma en cuenta los beneficios durante todos los periodos de la obra, se han visto casos en puentes y otras estructuras donde la solución civil más económica proviene de la utilización de materiales compuestos (Kendall, 2006).

Los aspectos donde los materiales compuestos pueden ser competitivos y reducir costos en las obras son los siguientes:

- Disminución en el costo de la construcción debido a que los elementos con materiales compuestos no requieren equipos de gran envergadura para su montaje debido a su baja densidad.
- El transporte a su vez de estos materiales no es costoso por este mismo motivo.
- Al ser materiales prefabricados se ahorran materiales para la obra falsa y el tiempo de construcción disminuye considerablemente, esto es beneficioso especialmente en lugares de vivienda y vías importantes que no se pueden cerrar por mucho tiempo.
- Disminución en los costos de mantenimiento, inspección, reparación y reemplazo de estructuras debido a sus propiedades de resistencia a fenómenos ambientales y durabilidad.
- Si son necesarios varios puentes, los costos de fabricación se disminuyen como lo ilustra la Figura 2.2.

Este último caso se estudió en Australia, donde era necesario reemplazar aproximadamente 12000 puentes de madera de poca luz contruidos antes de 1940 debido al deterioro de los puentes y la reducción de su funcionalidad, para esto se compararon los costos de reemplazar los puentes con la alternativa tradicional de concreto reforzado y la posibilidad de masificar la producción de puentes con FRP teniendo en cuenta los costos del material, fabricación, transporte y construcción para las dos propuestas, observando una gráfica similar a la Figura 2.2 y demostrando la viabilidad económica de los puentes con FRP (Kluft, 2011).

Las principales desventajas analizadas en este estudio de los puentes con materiales compuestos fueron su costo inicial, la falta de guías de diseño estandarizadas y experiencia de profesionales en el diseño, lo que a su vez aumenta los costos al haber pocas personas especializadas en este campo, pero se veían compensadas por su resistencia a la corrosión, alta resistencia, sostenibilidad entre otros.



(HP FUTURE-Bridge, 2008)

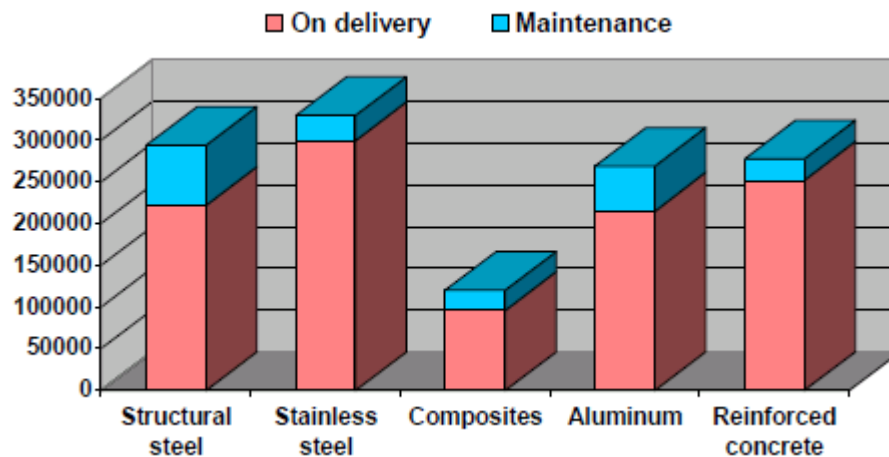
**Figura 2.2 Comparación de los costos económicos de puentes con FRP y puentes tradicionales**

### 2.1.5 Impacto ambiental de los materiales compuestos

Para determinar el impacto ambiental de diferentes alternativas y materiales de construcción es necesario considerar la sostenibilidad de las propuestas, es decir, buscar satisfacer las necesidades o problemáticas de la población actual de manera eficiente sin comprometer el futuro y propias necesidades de las próximas generaciones, un método para evaluar la sostenibilidad del proyecto es contemplar los recursos, impactos ambientales y a las personas durante todo el proyecto, considerando las entradas y salidas durante el diseño, construcción, la vida útil del proyecto y posterior reciclaje o reutilización de las partes o materiales, donde el ideal sería un ciclo cerrado donde las entradas del proyecto provengan de salidas de otras industrias y a su vez las salidas del proyecto sirvan para otros fines y fueran mínimos los impactos al ambiente y a las personas.

Considerando esta metodología para evaluar el impacto ambiental del uso de materiales compuestos en la construcción, estos materiales tienen la ventaja de tener alta resistencia con bajo peso y que al ser un material anisotrópico se puede diseñar de forma que el material solo trabaje en la dirección que realmente se requiera, lo que implica una optimización en el diseño de manera que no haya desperdicio del material, además debido a esto y a su bajo peso, en la etapa de construcción no se requieren grandes cantidades de maquinaria, hay mayor seguridad y se puede realizar en menos tiempo lo que disminuye los recursos empleados en la etapa de construcción lo que beneficia altamente a la comunidad. Durante la vida útil del proyecto el material compuesto no se corroe lo que implica a su vez menos entradas de personas y equipo en mantenimiento, además es un material con altos índices de durabilidad. A su vez, es necesario considerar las desventajas de los materiales compuestos dentro el ciclo del proyecto, las principales desventajas es que este material no es posible reciclarlo fácilmente para otros fines a diferencia del acero, debido a que su proceso de fabricación es irreversible lo que conlleva a impactos negativos sobre el ambiente (Fleck & Kuzy, 2012).

Es posible que para ciertos proyectos el método del análisis del ciclo de vida sea bastante complejo por la cantidad de información necesaria para la investigación a la hora de seleccionar los materiales y sea necesario recurrir a otros métodos para observar el impacto ambiental de las diferentes propuestas. Esto ocurrió para la construcción de un puente peatonal en Países Bajos donde se estudió la energía requerida y almacenada en el material además de la contaminación del agua y del aire para los materiales propuestos como solución del puente, concluyendo que para dicho caso la solución más sostenible era el puente con FRP como indica la Figura 2.3 (Ryszard, 2003).



(Ryszard, 2003)

### Figura 2.3 Energía requerida de las propuestas de construcción

Sin embargo debido a las sustancias químicas utilizadas para la fabricación de materiales compuestos, estos perjudican en gran medida el ambiente por la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles y Contaminantes Peligrosos del Aire, en especial el estireno utilizado como diluyente en resinas poliéster insaturadas, catalogado como un contaminante aéreo tóxico peligroso, es por esto que es necesario tener especial cuidado en la utilización y disposición de este tipo de sustancias y buscar medidas para disminuir las emisiones al ambiente.

Debido a que el uso de materiales compuestos es relativamente nuevo en el ámbito de la construcción, es necesario evaluar el comportamiento, impacto ambiental y a las personas, entradas y salidas de recursos y otros factores en el largo plazo de manera que se tenga mayor conocimiento sobre las implicaciones de sus ventajas y desventajas para evaluar su ciclo de sostenibilidad en cada proyecto.

#### 2.1.6 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos

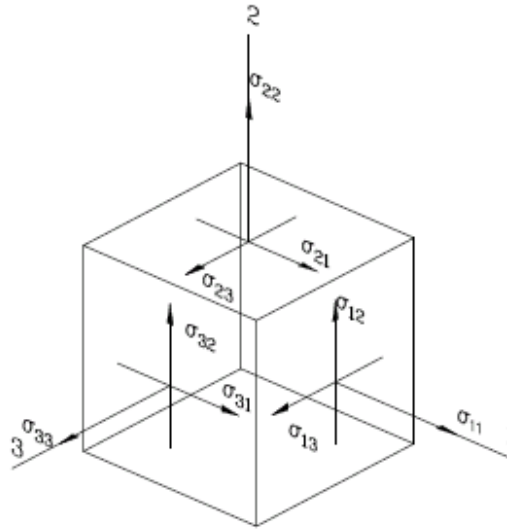
Un material compuesto al tener dos elementos constituyentes, fibra y matriz, con diferentes características, en el nivel microscópico las propiedades del material varían de un punto a otro dependiendo de la dirección en que se mueva y la relación entre estos materiales constituyentes, por lo que es necesaria una caracterización detallada de las propiedades micromecánicas del material.

Una primera simplificación es tomar una lámina como elemento básico constitutivo del material la cual consiste en una configuración de fibra y matriz y considerar las propiedades macromecánicas de esta expresadas como promedios ponderados de esfuerzo y deformación considerando un material homogéneo equivalente. (Gibson, 2007), la deformación media y deformación unitaria media se definen de acuerdo con la ecuación ( 2.1) y la ecuación ( 2.2) respectivamente, donde V es el volumen.

$$\bar{\sigma}_i = \frac{\int \sigma_i dV}{\int dV} \quad (2.1)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\int \varepsilon_i dV}{\int dV} \quad (2.2)$$

Un estado general de esfuerzos en tres dimensiones se puede representar mediante los esfuerzos  $\sigma_{ij}$  donde  $i, j = 1, 2, 3$  de la Figura 2.4, donde  $i$  representa el punto de aplicación y  $j$  la dirección de la componente de esfuerzo, de esta manera si  $i = j$  es un esfuerzo axial y si  $i \neq j$  es un esfuerzo cortante.



**Figura 2.4 Estado general de esfuerzos en 3D**

Para cada componente de esfuerzo existe a su vez una deformación unitaria del punto  $\varepsilon_{ij}$ , en un material elástico la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria se puede

escribir de manera matricial de acuerdo con la ecuación ( 2.3) la cual representa la ley de Hooke.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Teniendo en cuenta que  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  y que  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$  es posible concluir que  $C_{ijkl} = C_{jikl}$  y que  $C_{ijkl} = C_{ijkl}$ , además es posible demostrar que la matriz C es simétrica por medio de la función de densidad de la energía de deformación, por lo tanto es posible pasar de la ecuación ( 2.3) a la ecuación ( 2.4) teniendo en cuenta las siguientes reducciones:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_1 & \epsilon_{11} &= \epsilon_1 \\ \sigma_{22} &= \sigma_2 & \epsilon_{22} &= \epsilon_2 \\ \sigma_{33} &= \sigma_3 & \epsilon_{33} &= \epsilon_3 \\ \sigma_{23} &= \sigma_{32} = \sigma_4 & 2\epsilon_{23} &= 2\epsilon_{32} = \epsilon_4 \\ \sigma_{13} &= \sigma_{31} = \sigma_5 & 2\epsilon_{13} &= 2\epsilon_{31} = \epsilon_5 \\ \sigma_{12} &= \sigma_{21} = \sigma_6 & 2\epsilon_{12} &= 2\epsilon_{21} = \epsilon_6 \end{aligned}$$

Donde  $2\epsilon_{ij} = \gamma_{ij}$  el cual es la rotación total a cortante

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{SIM} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La ecuación ( 2.4) es la forma de un material anisotrópico, donde todos los 36 coeficientes de la matriz C son diferentes de cero y hay 21 coeficientes independientes, debido a la simetría de la matriz.

Dependiendo de la simetría del material existe una clasificación que determina la simetría de las propiedades del material, esta clasificación y las características de la matriz C de la ecuación ( 2.4) se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Características la matriz de relación esfuerzo – deformación unitaria**

Tipo de material	Número de coeficientes diferentes de cero	Número de coeficientes independientes
<b>Estado de esfuerzos en 3D</b>		
Anisotrópico	36	21
Ortotrópico en ejes no principales	36	9
Ortotrópico en ejes principales	12	9
Transversalmente isotrópico	12	5
Isotrópico	12	2
<b>Estado de esfuerzos en 2D</b>		
Anisotrópico	9	6
Ortotrópico en ejes no principales	9	4



Tipo de material	Número de coeficientes diferentes de cero	Número de coeficientes independientes
Ortotrópico en ejes principales	5	4
Balanceado Ortotrópico	5	3
Isotrópico	5	2

(Gibson, 2007)

Para determinar las constantes  $C_{ij}$  se realizan ensayos mecánicos a los materiales para determinar el módulo de elasticidad  $E_i$ , módulo de cortante  $G_{ij}$  y relación de Poisson  $\nu_{ij}$  y se determinan las relaciones entre ellas dependiendo de la simetría del material. Para calcular las deformaciones se utiliza la matriz S donde  $[S] = [C]^{-1}$

Para el caso general de la Figura 2.4 con esfuerzos axiales y esfuerzos cortantes, donde  $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$ , de un material isotrópico se tiene la siguiente matriz:

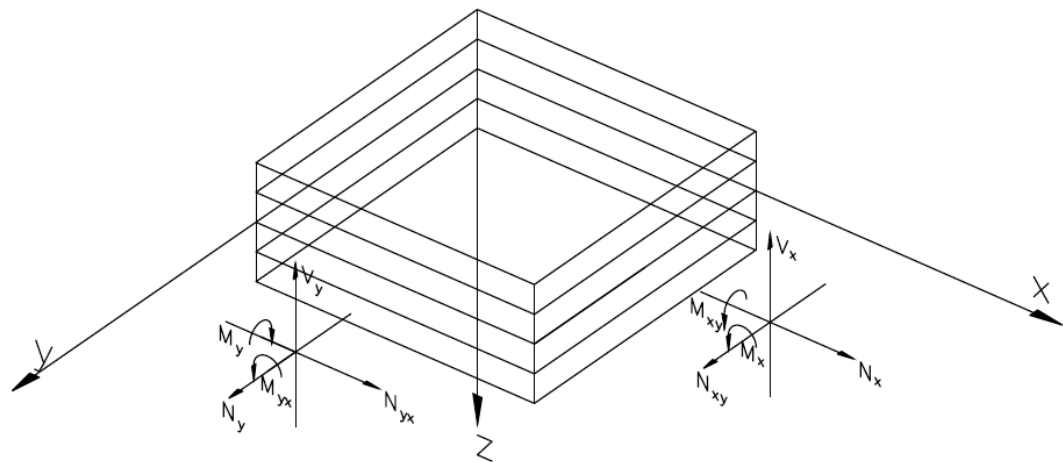
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & \nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & \nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Para el caso de una lámina ortotrópica en los ejes principales en un estado de esfuerzo plano se tiene la matriz:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & 2G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Por lo cual es necesario definir estas variables por medio de ensayos mecánicos estandarizados o información secundaria.

La utilización de una única lámina unidireccional para elementos estructurales no es muy utilizada debido a sus bajas propiedades mecánicas transversales, es por esto que se opta por emplear varias láminas llamados laminados, orientados en diversos sentidos según se requiera, unidos para formar un elemento estructural, existen múltiples combinaciones de laminados de manera que sea posible optimizar el diseño de acuerdo con los requerimientos de cada caso, la orientación de la lámina es escogida de manera que se satisfaga la rigidez y resistencia en la dirección de las cargas, teniendo en cuenta que el material compuesto es más rígido y resistente en la dirección de la fibra que en cualquier otro sentido y que un laminado con varias direcciones posee menos rigidez y resistencia por unidad de peso que un laminado unidireccional. (Barbero E. , 2010), existen diversas combinaciones de laminados como simétricos, antisimétricos, balanceados, laminados cuasi-isotrópicos, ortotrópicos entre otros, también es posible recurrir a una lámina con fibras pequeñas dispersas aleatoriamente de tal manera que tenga iguales propiedades en todos los sentidos sin embargo dichas propiedades son menores que las fibras continuas. El sistema de coordenadas para laminados está en la Figura 2.5.



**Figura 2.5 Sistema de coordenadas para laminados**

Es posible realizar una transformación de coordenadas para pasar de los coeficientes  $C_{ij}$  orientados en los ejes principales de la ecuación ( 2.4) a otra orientación  $xy$  con un ángulo  $\Theta$  respecto a 12 en una lámina y de esta manera obtener la ecuación ( 2.7).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dónde:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{22} \cos^4 \theta + Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

Para el análisis de un laminado es más útil convertir los momentos y fuerzas de la Figura 2.5 a momentos y fuerzas por unidad de longitud utilizando la ecuación ( 2.8), además al suponer que el espesor es más pequeño que las otras dos dimensiones, se busca que las fuerzas y desplazamientos queden expresados en términos de dos variables (x, y) para simplificar el análisis.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_y \\ V_x \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} dz$$

Al considerar cada una de las láminas que conforman el laminado se pasa de la ecuación ( 2.8) a la ecuación ( 2.9), donde k es número de la lámina de abajo hacia arriba y  $z_k$  la coordenada en z de la parte superior del espesor de la lámina.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{-z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k dz \\
 \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{-z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k z dz \\
 \begin{bmatrix} V_y \\ V_x \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{-z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}^k dz
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

El cálculo de las fuerzas y momentos por unidad de longitud, considerando cada una de las láminas y su dirección se expresa de manera matricial con la ecuación (2.10).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

$$\begin{bmatrix} V_y \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Donde  $k_x$ ,  $k_y$  son las curvaturas por flexión y  $k_z$  es la curvatura por torsión, y  $\epsilon_x^0$ ,  $\epsilon_y^0$  y  $\gamma_{xy}^0$  son las deformaciones unitarias de la superficie media, los coeficientes se calculan de esta manera:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$
$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij}^*)_k \left[ t_k - \frac{4}{t^2} \left( t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right) \right]$$

Donde  $\bar{z}_k$  es la coordenada del centro de la lámina. La matriz A, que contiene los coeficientes  $A_{ij}$ , es la matriz de rigidez en el plano, la matriz B relaciona deformaciones en el plano con momentos y curvaturas con esfuerzos en el plano que se relaciona con las láminas orientadas en otra dirección al sistema de referencia; la matriz D es la matriz de rigidez a momento y la matriz H es de rigidez a esfuerzos cortantes. A su vez existen gráficos con algunas combinaciones de laminados que proporcionan las principales características del laminado para el diseño como módulo de elasticidad, relación de Poisson, esfuerzo de falla a cortante y a carga axial entre otros.

## 2.2 SISTEMAS ESTRUCTURALES CON MATERIALES COMPUESTOS

La utilización de materiales compuestos en la construcción se ha incrementado en los últimos años debido a nuevos procesos y tecnologías que optimizan la producción y disminuyen el costo. Sin embargo, la inversión inicial requerida para utilizar estos materiales es mayor a la necesaria en proyectos que utilizan materiales tradicionales, razón por la cual los puentes diseñados con materiales compuestos son por lo general de luces pequeñas, son puentes peatonales o son obras para la investigación. Las principales configuraciones y usos de estos materiales en la construcción son:

- Elementos tipo sandwich conformados por varios materiales.
- Uso de fibra de carbono como sustituto del acero estructural para el refuerzo del concreto.
- Tendones y cables con fibras de carbono.
- Reparaciones de obras.
- Resinas y láminas externas sobre la estructura, utilizadas como refuerzo.
- Estructuras hechas totalmente con materiales compuestos.

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Estructuras híbridas con elementos con materiales tradicionales y otros miembros en FRP.

Los elementos tipo sandwich están conformados por dos laminas delgadas de material rígido y resistente y entre ellas se encuentra en el centro un núcleo grueso de material ligero con el fin de aumentar el momento de inercia de la sección y su capacidad a flexión con un elemento ligero, esta configuración se ha usado en la industria aeronáutica, automotriz, en la marina y otras industrias y se ha visto como alternativa interesante para la construcción. (Manalo, Aravinthan, & Karunasena, 2010)

La utilización de estos materiales en la obra civil se ha dado principalmente en puentes y edificaciones como refuerzo estructural. Este material sustituye el acero estructural debido a las propiedades de alta resistencia, bajo peso y en especial a su resistencia a la corrosión, debido a que la principal causa de deterioro del concreto reforzado es la corrosión del acero, por eso se utiliza en ambientes agresivos como refuerzo a flexión y a cortante, como ejemplo están el puente en Rollingsford en New Hampshire, Estados Unidos y el Museo de Arte de Milwaukee (Miravete, 2001). La principal desventaja de este uso es que las barras con FRP no poseen una respuesta inelástica como el acero, lo que se ve afectada la seguridad de las personas y la estructura si se llegan a esfuerzos cercanos al límite de elasticidad.

También se usa el refuerzo con compuestos con FRP para mejorar la condición y la capacidad sísmica de puentes con concreto en las columnas por medio de confinamiento con FRP sin perjudicar en gran medida el tráfico del puente, esta medida se utilizó en cerca de 3000 columnas con fibra de vidrio tipo E y matriz polimérica en la vía de Yolo en el oeste de Sacramento (Tuakta, 2004).

Debido al bajo peso de los elementos con FRP y a su alta capacidad para soportar cargas a tracción se postula que la forma más efectiva de utilizar FRP es como cables (Wang & Wu, 2010). Por esto se ha estudiado alrededor del mundo la viabilidad de reemplazar los cables de acero de los puentes atirantados que deben cubrir grandes luces por cables con fibra de carbono por sus ventajosas capacidades mecánica o combinaciones de fibras de carbono con acero o utilizando otros FRP como fibras de vidrio, aramida o basalto, en la Tabla 2.3 se muestran las propiedades mecánicas para diferentes tipos de cables que demuestran el interés para las alternativas con FRP.

Se utilizan cables con FRP para puentes colgantes, puentes atirantados y para el concreto postenzado como el puente Stork en Suiza contruistruido en 1996 para paso vehicular de 124 m de luz que utiliza cables con fibra de carbono y estado bajo constante y especializado monitoreo donde se ha encontrado que hasta el momento los cables han respondido de forma satisfactoria con altos índices y se propone el uso de cables similares para otros puentes con grandes luces (Meier, 2011).

Igualmente se han estudiado para puentes atirantados combinaciones de materiales como acero, concreto, fibra de carbono y otros materiales compuestos para cables y tableros, vigas y pilas evaluando su comportamiento estructural y costo para las diferentes combinaciones comprobando que el uso de fibras de carbono para cables y tableros de puentes atirantados de grandes luces es una excelente alternativa (Xiong, Cai, Zhang, & Xiao, 2011).

**Tabla 2.3 Propiedades de diferentes tipos de cables**

Tipo	Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a tracción (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)
HS acero	7800	1770	200	>3,5
CFRP	1800	3400	230	1,48
BFRP	2650	2100	91	2,3
B/CFRP 25 %	2438	1860	126	2,3
B/CFRP 50 %	2225	2383	161	1,48
B/CFRP 20 %	3680	2100	113	2,3
B/CFRP 30 %	4195	2100	124	2,3

(Wang & Wu, 2010)

En cuanto a reparaciones, el uso de materiales compuestos se presenta como una alternativa frente a la utilización de láminas metálicas adheridas al concreto, las cuales presentan dificultades por la corrosión del metal. Además, la anterior implementación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

requiere controles de calidad altos, es poco eficiente y el material posee un peso elevado, inconvenientes que se disminuyen con la implementación de fibras de carbono. El procedimiento consiste en reforzar el elemento estructural bien sea de concreto, acero, madera o adobe con láminas, tejidos o barras sobre la superficie externa, las dimensiones de este refuerzo dependen del tipo de elemento y la respuesta estructural buscada bien sea aumentar el tiempo de vida útil del elemento o corregir algún error en la construcción o en el mismo diseño.

Para la aplicación de un refuerzo con tejidos, se nivelan irregularidades en la superficie, luego se aplica una capa de resina de imprimación que sirve para mejorar la superficie y como capa de impermeabilización, para más adelante poner la cantidad de capas necesarias de tejido de FRP cada una separada por otra capa de resina y cuidando que no queden burbujas de aire en el proceso, por último se aplica una capa de resina para el acabado. El refuerzo con barras de FRP consiste en situar dichas barras sobre rozas como ilustra la Figura 2.6, el lugar de estas rozas dependerá si se desea mejorar la capacidad a cortante o a flexión del elemento y se rellenan con adhesivo estructural. El principio de estas reparaciones es el refuerzo por confinamiento que aumenta las capacidades a diferentes esfuerzos de los elementos. (Parrilla Calle, 2011). Se han realizado múltiples investigaciones y se ha llevado a la práctica el uso de FRP para aumentar la rigidez y resistencia de estructuras existentes y se ha probado que son efectivas (Tuakta, 2004).



(Parrilla Calle, 2011)

## Figura 2.6 Reparaciones en estructuras con barras de CFRP

También existen estructuras donde su sistema estructural completo es con materiales compuestos como lo es la Pasarela de Almuñécar localizada en Parque Madrid Río con 43 m de longitud y 5 m de ancho sobre el río Manzanares, el cual cuenta con un elemento monolítico de fibra de carbono prefabricada sin apoyos intermedios que puso una sola grúa sin necesidad de obra falsa sobre el río, que redujo los costos y transporte y montaje pero

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



su principal ventaja es que no sufre corrosión ni deterioro por las condiciones atmosféricas del sitio (Acciona, 2010).

Otro caso de estudio de estructuras que en su mayoría es construido con materiales compuestos es el puente peatonal atirantado que cruza el Río Tay en Escocia, el cual posee cables con aramida y el tablero, torre y las vigas longitudinales y transversales son prefabricadas con fibra de vidrio tipo E y resina que conforman el sistema estructural. La construcción fue relativamente sencilla por el bajo peso de la estructura, carga viva de diseño era de 5,6 kN/m mientras que la carga muerta era de solo 2 kN/m, además del hecho que los elementos eran prefabricados y revisados en fábrica por lo que la construcción consiste en ensamblar los elementos (Tuakta, 2004).

Los miembros contruidos con materiales compuestos, por lo general adoptan la forma de perfiles y conexiones hechos con materiales tradicionales, sin embargo, es necesario investigar en nuevas geometrías y configuraciones. La configuración más utilizada en puentes consiste en utilizar tableros con FRP y vigas hechas con materiales tradicionales como el acero, la madera o el concreto, lo anterior genera disminución del peso de la estructura y reduce problemas de corrosión ya que se minimiza el acero lo que disminuye el deterioro del tablero, además se disminuyen significativamente los tiempos de construcción ya que se utilizan elementos prefabricados hechos con materiales compuestos en lugar de utilizar concreto reforzado que requiere más tiempo de construcción, el puente Wolf Trap National Park en Viena aprovechó esto para reducir el tiempo de cerramiento de la vía (Flynn, 2013).

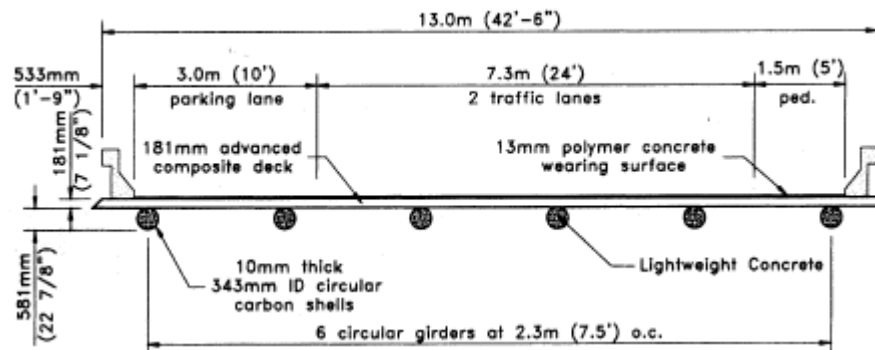
El sistema estructural de tablero en concreto reforzado y vigas con FRP usado en el puente peatonal de la sede de la EIA, es menos común, sin embargo, se encuentran casos como el Tom's Creek Bridge en Estados Unidos que cuenta con tablero en madera y vigas fabricadas con fibra de carbono y fibra de vidrio, también en esta categoría está el San Patricio Country Bridge de la Figura 2.7 el cual posee vigas con fibra de vidrio hechas con molde abierto y losa en concreto para sobrepasar dos vanos de 30 pies cada uno, al cual se le han monitoreado ensayos de carga viva, uno de los principales retos del diseño de este puente era controlar la deflexión de estas vigas que presentaban menor rigidez a vigas con materiales tradicionales (Government Engineering, 2005).



(Reitmann, 2007)

### **Figura 2.7 Vigas con fibra de vidrio del San Patricio Country Bridge**

Otro caso importante en el uso de este sistema es el King Stormwater Channel Bridge en San Diego, Estados Unidos construido en 2002 el cual posee vigas longitudinales de sección circular de fibra de carbono y epoxi rellenas con concreto y losa con concreto, fibra de vidrio tipo E y poliéster. El sistema de las vigas consiste en que las fibras de carbono dan forma, refuerzo a tracción para cortante y flexión además del confinamiento al concreto que aporta la resistencia a compresión y estabiliza el elemento. El puente consiste en un sistema viga-losa que posee una longitud de 20,1 m con un apoyo intermedio, tiene 6 vigas longitudinales con diámetro interior de 34 cm y 9,5 mm de espesor. (Burgueño, Karbhari, Seible, & Kolozs, 2001). La sección transversal del puente se aprecia en la Figura 2.8, algunas ventajas de este sistema es su fácil instalación, resistencia a la corrosión y a sismos, mayor resistencia de las vigas a explosivos y un menor mantenimiento.



(Burgueño, Karbhari, Seible, & Kolozs, 2001)

**Figura 2.8 Sección transversal de King Stormwater Bridge**

Otro puente con un sistema estructural de vigas con materiales compuestos y losa en concreto similar al puente peatonal de la EIA es un puente en España construido en el 2004 por Acciona en la Autovía del Cantábrico conformado por vigas con polímeros armados con fibra de carbono y losa de concreto reforzado, ilustrado en la Figura 2.9. Con una longitud total de 46 conformada por dos vanos de 13 m en el centro y dos vanos de 10 m en los extremos, con un ancho de tablero de 8 m. Las vigas del puente tienen una sección trapecial construidas con fibra de carbono y resina epoxi sobre un bloque de poliuretano, el tablero es con concreto reforzado y los conectores entre estos dos elementos son de un material compuesto de fibra de vidrio AR hecho con pultrusión (Mieres, Miravete, & Gutiérrez, 2006).



*(Rodríguez López, 2012)*

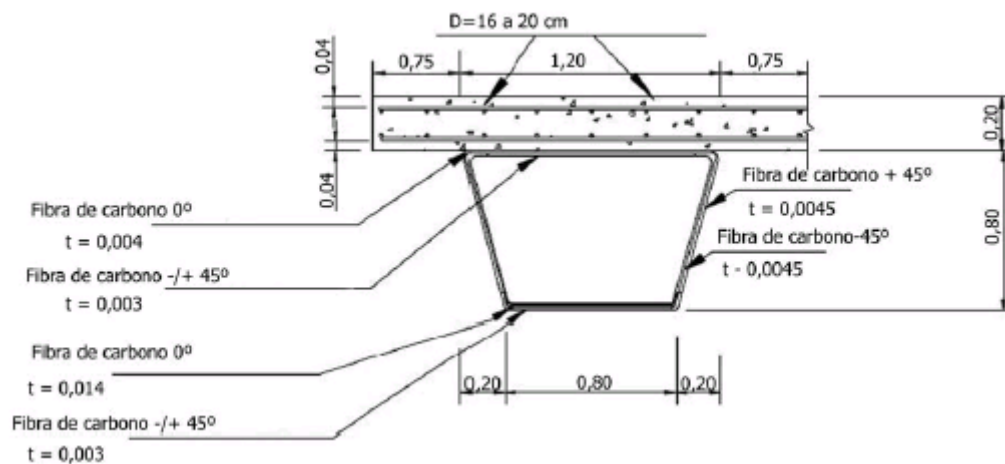
**Figura 2.9      Puente construido por Acciona en España con vigas con FRP**

Para este puente se realizaron los siguientes ensayos

- Ensayo de caracterización de los materiales
- Ensayo de conectores
- Ensayo de uniones
- Ensayos de abolladura
- Ensayo de envejecimiento
- Ensayos de la viga a escala 1:3
- Ensayos de la viga a escala 1:1

Con el fin de comprobar los resultados analíticos de rigidez, rigidizadores, conectores, carga última del puente. El ensayo de envejecimiento sirve para estimar la durabilidad de los materiales; éste último ensayo consistió en sumergir los laminados en un ambiente agresivo con pH y temperatura inspeccionada y extraer las muestras cada semana durante dos años para evaluar el deterioro del material y ensayos de carga sobre el puente antes de ponerlo al servicio (Mieres, Viñolo, Pineda, López, & Botello, 2004).

La principal limitación del diseño estructural de este puente fue la flecha, los estados límites últimos de resistencia se cumplieron ampliamente debido a las características de los materiales (Mieres, Miravete, & Gutiérrez, 2006). En la Figura 2.10 se muestra la sección transversal de los elementos del puente.



(Mieres, Miravete, & Gutiérrez, 2006)

**Figura 2.10 Sección transversal del puente construido por Acciona en España con vigas con FRP**

Para la construcción, en términos generales, de un puente con vigas con materiales compuestos y tablero con concreto reforzado, se sigue un proceso constructivo similar a un puente con vigas de cajón, donde usualmente las vigas cabezal y las pilas son hechas con concreto reforzado, pero la principal diferencia radica en que las vigas son construidas en la fábrica y se izan en la obra, con relativa facilidad ya que son elementos livianos, y allí se conectan con el sistema estructural, lo que reduce significativamente el tiempo de construcción del puente, si las vigas fueran en concreto y no hay necesidad del transporte y montaje de grandes grúas (Acevedo Pino & Barrientos Correa, 2008).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Existen muchos ejemplos de sistemas estructurales que utilizan materiales compuestos en todo el mundo, si se desean mirar más casos, se sugiere (Potyrala, 2011) y (Plymouth).

## 2.3 MÉTODOS DE DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS CON MATERIALES COMPUESTOS

Para el análisis de estructuras es necesario considerar las cargas a las que va a estar expuesta la estructura bien sean cargas estáticas o dinámicas, la compatibilidad de deformaciones que tiene que ver con la unión de los miembros y las relaciones propias de los materiales y su geometría considerando la relación de fuerza-desplazamiento, momento-curvatura, esfuerzo-deformación unitaria, módulo de cortante entre otros. Con la combinación de estas condiciones y ecuaciones se conocerá las fuerzas que actúan sobre los nodos y miembros de la estructura y sus respectivas deformaciones al aplicar un método de análisis estructural y esto servirá para hacer el diseño de la estructura.

Entre los métodos de diseño existentes está el método de esfuerzos admisibles (ASD) donde se considera la fuerza a la que estará expuesta la estructura y un factor de seguridad que determina el esfuerzo admisible y un margen de seguridad como lo determina la ecuación ( 2.11) donde  $\sigma_{adm}$  es el esfuerzo admisible,  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia y F.S. el factor de seguridad. Si el esfuerzo actuante es mayor al esfuerzo admisible es necesario realizar ajustes en el diseño, cambios de configuración de la estructura, geometría y materiales de los miembros de manera que el esfuerzo actuante sea menor al esfuerzo admisible. Las desventajas de este método son que no considera si el material posee un rango inelástico, hay incertidumbre sobre las cargas actuantes escogidas de manera determinística y el factor de seguridad es elegido de manera subjetiva generando una incertidumbre sobre la resistencia y comportamiento real de la estructura. (Duque Uribe, 2013).

$$\sigma_{adm} = \frac{f_y}{F.S.} \quad (2.11)$$

Otros métodos de diseño existentes para las estructuras son el método de la resistencia última, el cual considera la metodología de los factores de carga y de resistencia (LRFD) y el método de los estados límites, donde además de tomar en cuenta el estado límite de resistencia dado por el método de la resistencia última, se consideran los estados límites de servicio, de eventos extremos, fatiga y fractura, donde se definen los estados límites

como una condición extrema donde más allá de ella, la estructura no cumple el propósito para el que fue diseñada y la probabilidad de falla de la estructura es la posibilidad de sobrepasar un estado límite durante su vida útil. (Guerra, Sánchez, & Reyes, 2006).

El estado límite de resistencia se basa en la ecuación ( 2.12) donde se consideran las incertidumbres de las cargas y la resistencia del material por medio de estudios probabilísticos. Donde  $\gamma$  es el factor de carga,  $Q$  es el tipo de carga,  $\Phi$  es el factor de reducción de resistencia del material y  $R_n$  es la resistencia nominal.

$$\sum \gamma Q \leq \phi R_n \quad (2.12)$$

Para el diseño de estructuras con FRP es necesario seguir los requisitos del código o norma de diseño del lugar de la estructura. La ASCE recomienda el uso de *Design of Plastics Structural Components*, en Europa existen guías para el diseño como el *EUROCOMP 1996 Design Code* y *EUROCOMP 1996 Handbook* que se basan en el método de los estados límites, siguiendo la ecuación ( 2.13) y la ecuación ( 2.14) para el diseño.

$$E_d \leq R_d \quad (2.13)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (2.14)$$

Dónde:

- $E_d$ :esfuerzo calculado, incluyendo factores de carga de SIA 260/261
- $R_d$ : Resistencia de diseño
- $R_k$  : Resistencia nominal
- $\gamma_m$ : Coeficiente de reducción de la resistencia basado en factores de reducción por temperatura, proceso de producción, postcurado y desviación de las propiedades del material

Una vez se tengan establecidas las cargas que actuarán sobre la estructura y el método de diseño a emplear se definen unas posibles configuraciones estructurales y elementos con sus respectivas geometrías y propiedades de acuerdo con la experiencia o teniendo en cuenta el ejemplo de otras estructuras con problemas similares en otros lugares, en el caso

de plantear elementos con materiales compuestos es necesario definir el tipo de fibra y resina de una lámina, el número de láminas que conforman el laminado definiendo la orientación de las fibras y el espesor de cada una de las láminas; al definir una configuración preliminar se procede realizar el análisis estructural que determina los esfuerzos y deformaciones de cada una de las partes, para esto se utilizan las ecuaciones de equilibrio las relaciones de los materiales de acuerdo con la sección 2.1.6 y compatibilidad de deformaciones, al tener estos valores se comparan con los requisitos de la estructura dados por una norma o por las exigencias propias de la obra, este proceso se realiza iterativamente hasta encontrar una solución óptima, que cumpla todas las normativas y requisitos del proyecto y sea viable desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

Los principales criterios que rigen el diseño y comportamiento de la estructura, relacionados con los estados límites de diseño son los siguientes:

- Criterio de esfuerzo máximo
- Criterio de deformación máxima
- Criterio de la interacción de falla
- Criterio de la deformación máxima truncada
- Criterio de Tsai - Wu
- Criterio de Tsai – Hill

### **2.3.1 Diseño de elementos tipo viga con materiales compuestos**

Las vigas son componentes de los sistemas estructurales que se cargan para soportar fuerzas especialmente de flexión. Las vigas con materiales compuestos pueden ser prismáticas o cónicas y contruidas mediante pultrusión, molde abierto entre otros, buscando que la viga sea de pared delgada para reducir material, peso y costos y que satisfaga los límites de esfuerzos y deformaciones máximas, por lo que se revisan los efectos de flexión, cortante, torsión y cargas axiales dependiendo de las fuerzas que se apliquen.

Para este análisis se considera una viga de pared delgada, simplemente apoyada con una carga uniformemente distribuida como la del puente peatonal.

Para considerar las deformaciones máximas en los materiales compuestos es necesario considerar las deflexiones por flexión y por cortante, donde la primera se controla por el módulo de elasticidad y el momento de inercia y la segunda por el módulo a cortante y el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



área, para el cálculo de cada una de las deflexiones es necesario recurrir a los diagramas de cortante y momento; y al principio de trabajo virtual.

$$V = \frac{wL}{2} - wx$$

$$M = \frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2}$$

$$\Delta = \int_0^L \frac{m M}{EI} dx + \int_0^L \frac{f_s v V}{GA} dx = 2 \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{1}{EI} \left(\frac{x}{2}\right) \left(\frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2}\right) dx + 2 \int_0^L \frac{f_s}{GA} \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{wL}{2} - wx\right) dx$$

$$\Delta = \frac{5 w L^4}{384 EI} + \frac{f_s w L^2}{8 GA}$$

Donde  $f_s$  es el factor de forma que depende de la sección de viga

El cálculo del esfuerzo máximo a cargas axiales y cortantes se realiza mediante estas ecuaciones:

$$\sigma = \frac{M c}{I} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{Q V}{I t} \quad (2.16)$$

Donde Q es el primer momento del área

I es el momento de inercia

t es el espesor

c es la distancia del eje neutro a el punto máximo y mínimo de la sección.

Por las características de los materiales compuestos es necesario considerar por separado los esfuerzos a tracción y compresión, además tener en cuenta los factores  $\phi$  de reducción del material y los factores Y de carga del método de estados límites.

En el diseño de una viga con materiales compuestos es necesario definir el material que incluye fibras y resina; número de láminas, espesor y orientación de las láminas y las

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

secuencias de las láminas y sección transversal de la viga. Para esto es necesario calcular los esfuerzos a los que está expuesta la viga y seguir un proceso iterativo de diseño hasta alcanzar un diseño satisfactorio en todos los requisitos del elemento.

La elección del material depende de la magnitud de los esfuerzos y los costos del material, para conocer las propiedades de diferentes tipos de laminados, se grafican varias propiedades ante varias configuraciones de láminas utilizando la ecuaciones de la sección 2.1.6, que dependen principalmente de la proporción del espesor de fibras en una dirección respecto al total del espesor del laminado, a manera de ejemplo, para el caso de láminas con direcciones de 0°, 45° y 90° se cumple:

$$\alpha = t_0/t$$

$$\beta = t_{90}/t$$

$$\mu = t_{\pm 45}/t$$

$$\alpha + \beta + \mu = 1$$

## 2.4 VIGAS COMPUESTAS

Las vigas compuestas son aquellas que están conformadas por dos o más materiales con el fin de combinar las propiedades de estos materiales de manera que se tenga un modo más eficiente de soportar las cargas, en el caso de las vigas del puente de estudio de la EIA estas están formadas por poliestireno expandido y el material compuesto de fibra de carbono con láminas en varias direcciones. La teoría clásica de vigas a flexión se desarrolla con un material homogéneo, de manera que es necesaria una transformación de la sección transversal de la viga para simular un solo material con el fin de conocer los esfuerzos a flexión en cada zona (Hibbeler).

Ante un momento a flexión sobre una sección transversal de una viga compuesta con diferentes módulos de elasticidad y rigidez en la unión de los materiales hay un salto en los esfuerzos pero la deformación unitaria es la misma, para satisfacer esta condición suponiendo un único material se utiliza el factor de transformación n calculado en la ecuación ( 2.17).

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (2.17)$$

De esta manera se modifica el ancho en la sección transversal del material transformado y se obtiene un material homogéneo donde es posible encontrar el centroide de la sección, el momento de inercia y los esfuerzos a flexión en cada punto. Para encontrar los esfuerzos sobre el material transformado se utiliza nuevamente el factor de transformación.

## 2.5 RESPUESTA DINÁMICA DE ELEMENTOS DE RIGIDEZ CONSTANTE Y MASA DISTRIBUIDA

Para el análisis dinámico de algunas estructuras, como edificios, es común modelarlas con un número de masas concentradas con el fin de simplificar el análisis, al trabajar con un número finito de grados de libertad que sirven para representar la posición de la estructura en un momento dado frente a una excitación, donde al tener un mayor número de masas se tendrá mayor precisión en el modelo. Para estructuras donde la masa es parte de un elemento flexible se tiene un sistema de masa distribuida con infinitos grados de libertad. (García Reyes, 1998). Los puentes pertenecen a este último caso, por lo que es necesario realizar un análisis dinámico como se explica a continuación.

Para una viga simplemente apoyada con vibración transversal, se toma un diferencial de longitud el cual posee un diferencial de masa incorporado y se hace un diagrama de cuerpo libre considerando las fuerzas cortantes y momentos, el principio de D' Alembert, las fuerzas aplicadas y el amortiguamiento con respecto a la longitud del elemento con un punto de referencia establecido.

Para el caso de vibración no forzada sin amortiguamiento, se puede relacionar el movimiento de la viga con la ecuación (2.18).

$$m(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (2.18)$$

Al solucionar esta ecuación diferencial, para encontrar la deformación de la viga se tiene en forma general la ecuación (2.19)

$$\phi(x) = C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x + C_3 \sinh \beta x + C_4 \cosh \beta x \quad (2.19)$$

Con

$$\beta^4 = \frac{w^2 m}{EI}$$

Al considerar una viga simplemente apoyada en los dos extremos se establecen los límites de frontera de la ecuación, que indican que la deformación y el momento son cero en los dos apoyos, de esta manera es posible demostrar que  $C_2 = C_3 = C_4 = 0$  y la ecuación (2.19) se reduce a la siguiente expresión:

$$\phi(x) = C_1 \sin \beta x$$

En  $x=L$  se tiene

$$C_1 \sin \beta L = 0$$

Para no tener una solución trivial con  $C_1=0$  donde no se tiene vibración, el seno debe ser cero por lo tanto

$$\beta L = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$w_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.20)$$

$$\phi_n(x) = C_1 \sin \frac{n\pi x}{L}$$

De esto se concluye que se tienen infinitas frecuencias y diferentes modos de vibración transversal para una viga simplemente apoyada, donde se pueden encontrar las frecuencias y deformaciones con estas ecuaciones (Chopra).

## 2.6 MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CORTANTE

En la construcción del puente peatonal de la EIA se pone en la parte superior de las vigas prefabricadas, resina y posteriormente se ponen sobre esta cada una de las losas de concreto, por lo tanto al tener elementos diferentes, las losas y las vigas se pueden deslizar

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

relativamente una sobre la otra generando un flujo de cortante horizontal en la superficie de contacto. El cortante horizontal se calcula utilizando la ecuación ( 2.21).

$$v_h = \frac{VQ}{I_c b_v} \quad ( 2.21)$$

Donde V es el cortante en cada punto de la viga, Q es el primer momento de inercia del área de la losa con respecto al eje del centroide de la sección compuesta,  $I_c$  es el momento de inercia de la sección compuesta y  $b_v$  es el espesor de la interface de la viga y la losa.

La resistencia frente a este movimiento relativo del cortante horizontal depende de la suma de la resistencia a fricción y a cohesión entre los materiales que se puede determinar mediante diversos ensayos (Wight & MacGregor).

En el San Patricio Country Bridge la transferencia de cortante horizontal entre la losa y las vigas se realiza mediante tubos metálicos de alta resistencia de una pulgada y media de diámetro con un espaciamiento de 16 pulgadas (Creese, 2004). Esto se puede apreciar en la Figura 2.7.

### 3 METODOLOGÍA

El trabajo investigativo se realizó de acuerdo con las siguientes etapas:

**Etapla 1. Identificación de los principios de mecánica estructural que rigen el comportamiento a flexión y cortante de los elementos tipo viga de un puente construido con elementos conformados con secciones con materiales compuestos.**

Se efectuó una búsqueda de información acerca de elementos compuestos en estructuras, sus propiedades, principios, limitaciones, métodos de construcción y los tipos de configuración o sistemas estructurales con materiales compuestos, además de los estudios realizados en estructuras similares al puente de la sede de la EIA.

**Etapla 2. Estimación de la rigidez del sistema a partir de sus condiciones de apoyo, geometría, masa, periodo de vibración y mediciones de deflexión bajo niveles de carga determinados.**

La estimación de la rigidez del sistema se cumplió en los siguientes pasos:

#### **Medición de las deflexiones**

Se realizaron mediciones de deformaciones por medio de los potenciómetros, topografía y las galgas extensiométricas en diferentes puntos del puente, en cada uno de los incrementos de carga, aumentos del 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la carga de viva, a partir de las deflexiones, la carga y la geometría del puente es posible calcular su rigidez.

#### **Estimación de la rigidez a partir del periodo de vibración fundamental**

Se calculó una estimación de la rigidez a flexión del puente a partir del periodo de vibración fundamental de la estructura. La medición, procesamiento y resultados de la información de vibraciones del puente no fueron parte de este trabajo y fueron suministrados por el profesor Carlos Andrés Blandón Uribe.

**Etapla 3. Comparación de los resultados de ensayos de carga anteriores con los realizados durante este proyecto y determinación de variaciones de rigidez del puente.**

Se procesaron los datos obtenidos en la Etapa 2, se calibró el modelo y con estos datos se determinó la rigidez del sistema, los resultados obtenidos se compararon con los calculados en el 2011.

**Etapla 4. Ajuste del modelo numérico y validación de las hipótesis de diseño, de acuerdo con los resultados de las mediciones experimentales, de un puente construido con elementos compuestos.**

Estudio del modelo numérico del diseño el puente de acuerdo con las propiedades de diseño. Una vez realizado lo anterior se calibró el modelo numérico con los resultados obtenidos en los ensayos de manera que se represente en mejor medida el comportamiento del puente.

De acuerdo con la respuesta real del puente obtenida en los ensayos de la Etapa 2 y los cálculos realizados en la Etapa 3 se evaluó las hipótesis de diseño, analizando las diferencias alcanzadas.

## 4 MODELO NUMÉRICO

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE DE ESTUDIO

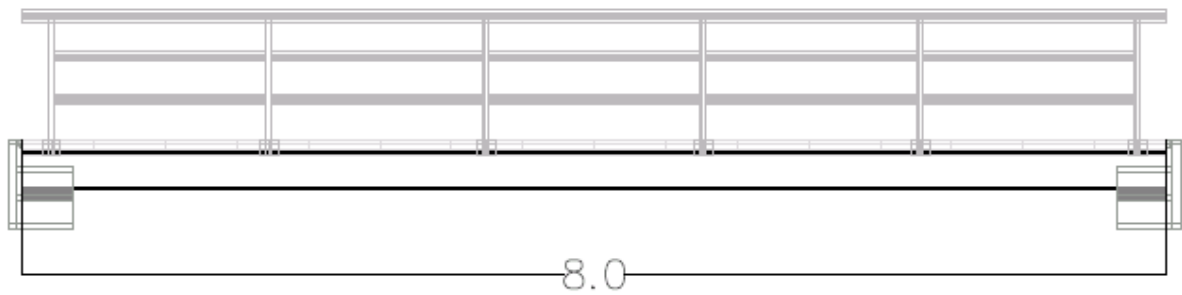
En el año 2011 Constructora Conconcreto S.A. edificó en la sede de Las Palmas de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, un puente peatonal de una luz, con un elemento compuesto basado en losas de concreto reforzado prefabricado y vigas constituidas por fibras de carbono y poliestireno expandido. El puente peatonal se encuentra por encima de la quebrada La Mocha, sus dimensiones en metros y algunas características se aprecian en las siguientes figuras:



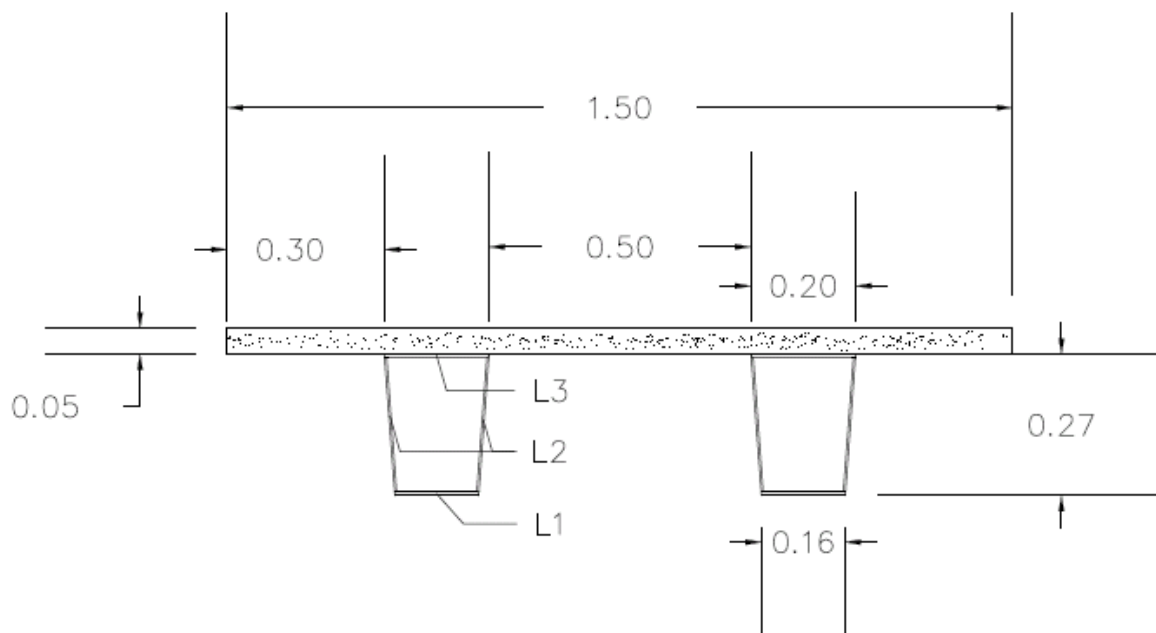
**Figura 4.1** Puente peatonal de la EIA objeto de estudio

El puente cuenta con una sección longitudinal de 8 m y una sección transversal conformada por dos vigas trapeciales con cuatro laminados en cada una de sus caras y una losa en concreto reforzado, unidas por un pegamento epóxico.





**Figura 4.2** Sección longitudinal del puente



**Figura 4.3** Sección transversal del puente



**Figura 4.4** Detalle de las vigas longitudinales



**Figura 4.5** Detalle de la unión viga losa

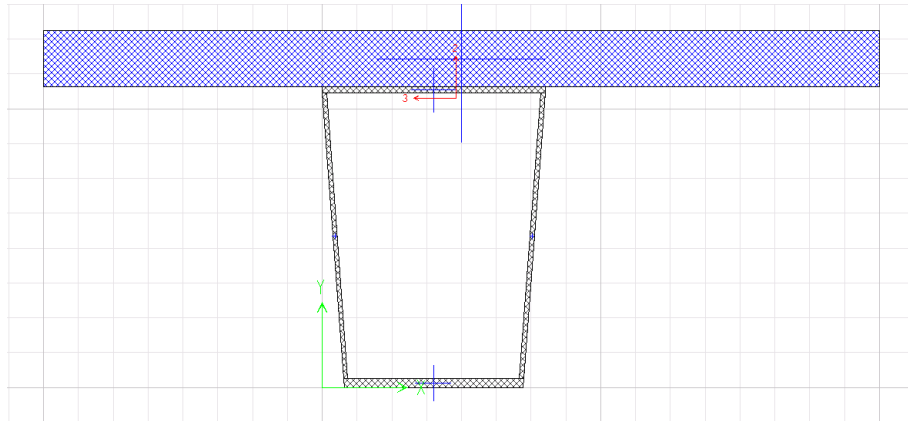
## **4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL PUENTE**

Con base en los resultados del análisis de las propiedades de los materiales del puente, se construye el modelo del mismo utilizando el programa SAP2000, el cual consiste en un elemento *frame* de la sección compuesta de la viga y la losa, que tiene la sección transversal mostrada en la Figura 4.6 la cual incluye el ancho aferente de la losa. Cada una

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de las caras de la viga tiene el material homogéneo ortotrópico equivalente de la **¡Error! No e encuentra el origen de la referencia.** con su respectivo espesor.



**Figura 4.6 Sección transversal de la sección compuesta de la viga**

En la Tabla 4.1 se muestran las propiedades de la sección compuesta calculadas por el programa SAP2000, las cuales corresponden a la sección compuesta transformada en el material base. Estas propiedades se asemejan a las propiedades calculadas por el programa CADEC de la sección de la viga, lo que indica que el modelo es apropiado.

**Tabla 4.1 Propiedades sección compuesta**

Material base	Mat-L1
Área (m <sup>2</sup> )	0,012918
I33 (m <sup>4</sup> )	0,000107
I22 (m <sup>4</sup> )	0,000497
Z33 (m <sup>3</sup> )	0,001196
Z22 (m <sup>3</sup> )	0,007331

## **5 ENSAYOS DE VIBRACIÓN SOBRE EL PUENTE DE SECCIÓN COMPUESTA DE LA EIA**

### **5.1.1 Descripción**

Se realizaron ensayos de vibración ambiental y forzada en el puente, tanto en el sentido transversal como en el longitudinal con el fin de conocer el periodo de vibración de la estructura y de esta manera calcular su rigidez. Para esto se ubicaron dos sensores en el puente que captan las frecuencias ante fuerzas aplicadas en el sentido longitudinal y transversal y frente a la vibración natural de la estructura, el equipo de estos ensayos se muestra en las siguientes figuras:



**Figura 5.1**      **Equipo empleado en los ensayos de vibración**

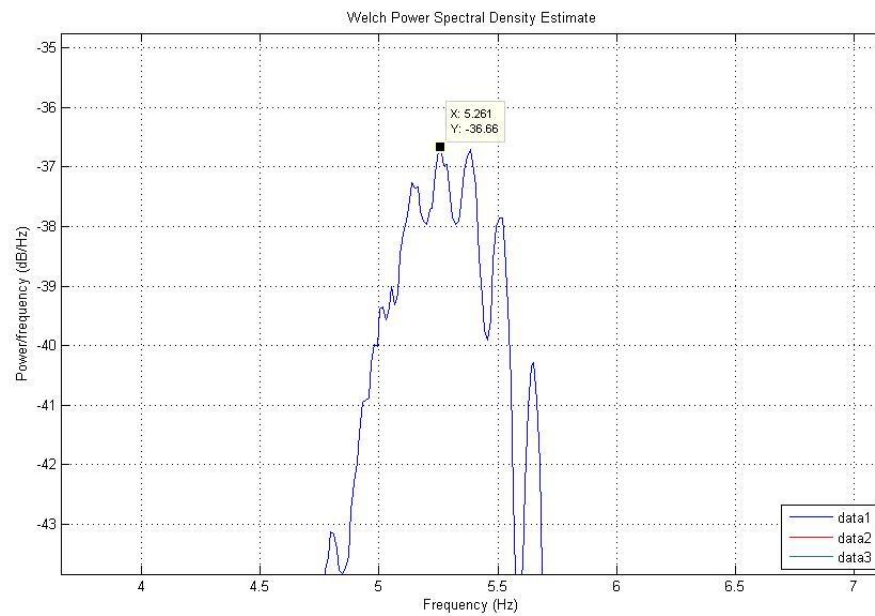


**Figura 5.2    Sensores del ensayo de vibración**

### **5.1.2 Resultados**

Los resultados de las frecuencias de vibración del puente fueron suministrados por el profesor Carlos Andrés Blandón. En la Figura 5.3 se presenta el detalle de los picos del *Power Spectral Density* de Welch, en este pico se presenta mayor contenido frecuencial y coincide con los modos fundamentales de vibración del puente. Para el primer modo de vibración en el sentido vertical se encuentra una frecuencia 5,261 Hz para después de los ensayos de carga, con esta frecuencia, la longitud y masa del puente y de los contenedores, se calcula la rigidez a flexión para todo el puente y para una viga de acuerdo con la ecuación ( 6.1) de la sección 6.2. Los resultados se muestran en la Tabla 5.1.

La masa para este ensayo corresponde a la masa del puente más la de los contenedores, la masa de estos últimos se calculó de acuerdo a sus dimensiones y peso específico. La formaleta con un área total de 18,35 m<sup>2</sup> y 13 kg/m<sup>2</sup> y, mientras los largueros tenían un volumen de 0,12 m<sup>3</sup> y un peso de 5,88 kN/m<sup>3</sup>.



**Figura 5.3 Frecuencia de vibración del puente después de los ensayos de carga**

**Tabla 5.1 Rigidez a flexión a partir de la frecuencia de vibración**

L (m)	8
modo (n)	1
m (kg/m)	281,40
$w_n$ (rad/s)	33,055
$T_n$ (s)	0,190
$f$ (1/s)	5,261
El (kN·m <sup>2</sup> ) puente	12929,20
El (kN·m <sup>2</sup> ) viga	6464,60

## 6 ENSAYOS DE CARGA SOBRE EL PUENTE DE SECCIÓN COMPUESTA DE LA EIA

### 6.1 DESCRIPCIÓN

Las pruebas de cargas en el puente tienen como objetivo determinar deformaciones y deflexiones de la estructura, para esto se instalaron sensores en diversos lugares obteniendo los registros de los ensayos. De igual manera se desarrollaron mediciones topográficas para medir el asentamiento de los estribos. Las pruebas realizadas consistieron en liberar los apoyos utilizados durante el proceso constructivo, y posteriormente aplicar incrementos de carga según lo sugerido por la NSR-10 hasta conseguir la carga viva de diseño del puente; adquiriendo como resultado las deformaciones y deflexiones en diferentes puntos del puente ante incrementos de carga del 25 %, 50 %, 75 %, 100 % y descarga de la carga viva de diseño de la obra.

El desempeño del puente peatonal de la EIA se logra valorar determinando los cambios de rigidez de los elementos estructurales. y el conjunto de la estructura que pueden ser causados por desconexión de los elementos, flujo plástico o deterioro mecánico de los materiales, variaciones en la geometría de las partes de la estructura, entre otros cambios causados por la utilización del puente, condiciones ambientales y otros fenómenos.

Para la verificación de la rigidez del puente es necesario realizar medidas de la deflexión de la estructura frente a cargas incrementadas y el peso propio de la obra. Las mediciones de las deformaciones de la edificación en diferentes condiciones de carga y un ensayo de flexión sobre el puente permiten conocer la variación de las propiedades y su comportamiento teniendo como referencia las pruebas realizadas anteriormente, luego de la construcción de la obra.

Para las mediciones de las deformaciones durante el ensayo de carga fue necesario instalar *strain gauges* en el extremo de una viga, en el centro de la luz en la cara inferior de las dos vigas, en el centro de la luz en la cara superior de la losa y en los estribos del puente, como se muestra en la Figura 6.1, además se pusieron potenciómetros en cada uno de los apoyos de la viga, en el centro de la luz y a 3,2 m y a 4,8 m en cada una de las vigas.





**Figura 6.1**     *Strain gauges* en el extremo de la viga



**Figura 6.2**     Potenciómetro en el apoyo

## **6.2 ENSAYOS DE CARGA EN EL 2011**

Una vez construido el puente en el 2011 se realizaron ensayos de carga y se midieron las deformaciones en diferentes puntos del puente con topografía. Para validar el modelo numérico se cargaron en este las cargas del ensayo y se compararon las deformaciones del modelo con las medidas, en la Tabla 6.1 se presenta la ubicación de los sensores de acuerdo con (Grupo de Estructuras y Construcción , 2013).

---

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

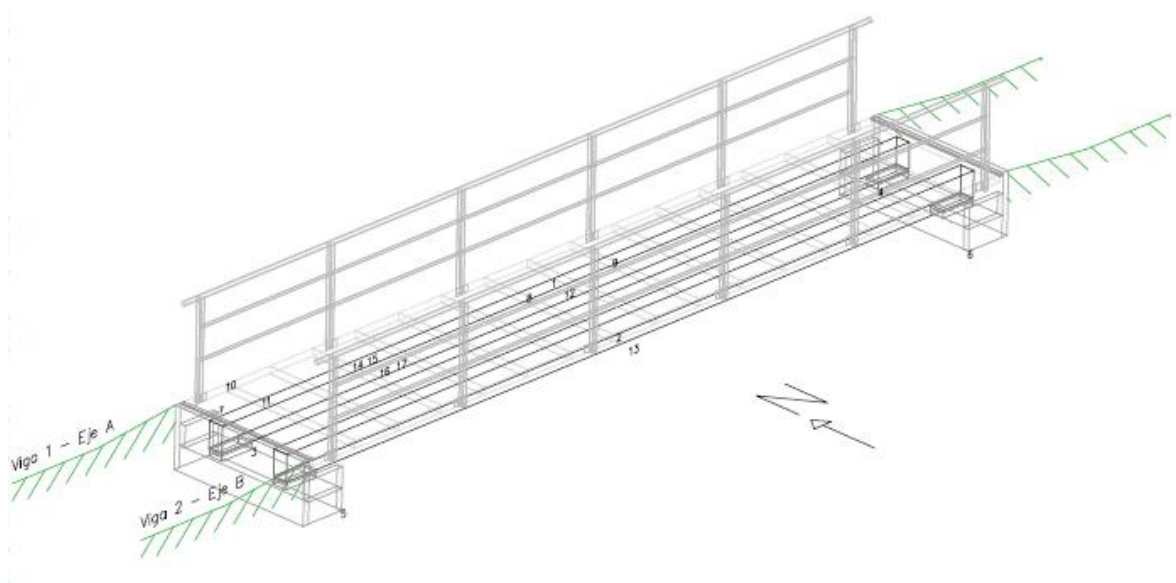


**Tabla 6.1 Listado de sensores**

Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
1	Central	Potenciómetro	Deflexión centro de la viga.	Centro de la luz viga 1
2	Central	Potenciómetro	Deflexión centro de la viga.	Centro de la luz viga 2
3	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo occidental viga 1
4	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo oriental viga 1
5	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo occidental viga 2
6	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo oriental viga 2
7	Apoyo	Potenciómetro	Deslizamiento relativo de placa de concreto y viga de fibra de carbono	Apoyo norte occidental viga 1
8	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al occidente de la junta central sobre la viga 1
9	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al oriente de la junta central sobre la viga 1
10	Apoyo	Galga para concreto	Deformación en parte inferior de la placa de concreto para detectar deslizamiento en la interface placa-viga	Apoyo norte occidental de la viga 1

Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
11	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en parte superior de la viga de carbono para detectar deslizamiento en la interface placa-viga	Apoyo norte occidental de la viga 1
12	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 1
13	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 2
14	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 90 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo norte occidental de la viga 1 a una distancia de 2 veces la altura de la viga desde el rigidizador interior
15	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 0 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo norte occidental de la viga 1 a una distancia de 2 veces la altura de la viga desde el rigidizador interior
16	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 90 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo norte occidental de la viga 1 en el medio entre el rigidizador interior y el exterior

Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
17	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 0 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo norte occidental de la viga 1 en el medio entre el rigidizador interior y el exterior



**Figura 6.3 Ubicación de los sensores**

Nota: La ilustración no está a escala

En la Tabla 6.2 se muestran las cargas impuestas a cada viga, cada uno de los estado de carga corresponde al 25 %, 50%, 75 % y 100 % de la carga de diseño respectivamente.

**Tabla 6.2 Cargas del ensayo**

Estado de carga	Carga impuesta por viga (kN/m)
1	0,988
2	1,705
3	2,574
4	3,459

(Grupo de Estructuras y Construcción, 2011)

En las siguientes tablas se muestran las deflexiones de las dos vigas medidas con topografía, las de los sensores en el centro de la luz y las deformaciones del modelo para los diferentes estados de carga, el estado de carga 5 corresponde a la carga del estado de carga 4 durante 24 horas. Las abscisas de los puntos aumentan de oeste a este. Las deformaciones medidas fueron suministradas por Constructora Conconcreto S. A .

**Tabla 6.3 Deflexiones medidas en el eje A**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)	Estado de carga 5 (m)
0	0	0	0	0,0005	0,0005
3,2	0,007	0,0115	0,0185	0,026	0,028
4,8	0,01	0,0165	0,026	0,036	0,039
6,4	0,0065	0,011	0,018	0,025	0,027
8	0	0	0	0	0,001

**Tabla 6.4 Deflexiones medidas en el eje 2**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)	Estado de carga 5 (m)
0	0	0	0	0	0
3,2	0,0075	0,0125	0,0195	0,0265	0,0285
4,8	0,0095	0,0165	0,026	0,036	0,038

6,4	0,006	0,011	0,018	0,025	0,027
8	0	0,0005	0,0005	0,001	0,002

Como se puede observar en las anteriores tablas se midieron deformaciones en los apoyos, en los puntos 0 y 8 del puente, las cuales corresponden a aplastamientos en el elastómero, por lo que se corrigen las deflexiones de manera que se puedan comparar con las dadas por el modelo.

**Tabla 6.5 Deflexiones corregidas del eje A**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)	Estado de carga 5 (m)
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,2	0,0070	0,0115	0,0185	0,0258	0,0273
4,8	0,0100	0,0165	0,0260	0,0358	0,0383
6,4	0,0065	0,0110	0,0180	0,0248	0,0263
8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

**Tabla 6.6 Deflexiones corregidas del eje B**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)	Estado de carga 5 (m)
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,2	0,0075	0,01225	0,01925	0,026	0,0275
4,8	0,0095	0,01625	0,02575	0,0355	0,037
6,4	0,006	0,01075	0,01775	0,0245	0,026
8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Las deflexiones en los puntos 3,2 m y 4,8 m deberían ser iguales debido a la simetría presente en estos puntos, por lo que se identifican errores en las mediciones.

**Tabla 6.7 Deflexiones de los potenciómetros**

Viga	Puntos del puente (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4
1	4	0,00644	0,01284	0,02074	0,03079
2	4	0,00613	0,01253	0,0203	0,03063

**Tabla 6.8 Deflexiones del modelo**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)	Estado de carga 5 (m)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
3,2	0,007216	0,012450	0,018797	0,025262	0,025262
4,8	0,007216	0,012450	0,018797	0,025262	0,025262
6,4	0,004504	0,007772	0,011734	0,015770	0,015770
8	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	0,007612	0,013133	0,019829	0,026648	0,026648

Las deflexiones medidas con topografía, por medio de los potenciómetros y las del modelo se comparan en las siguientes tablas y figuras. Para las tablas, los puntos 3,2 m; 4,8 m y 6,4 m son medidos con topografía y el punto 4 con los potenciómetros, para las figuras la primera columna corresponde al eje A y la segunda al eje B, los puntos en azul son las cotas iniciales del puente (cotas del puente sin cargar), los rojos son las deflexiones con topografía y los verdes corresponden al modelo numérico.

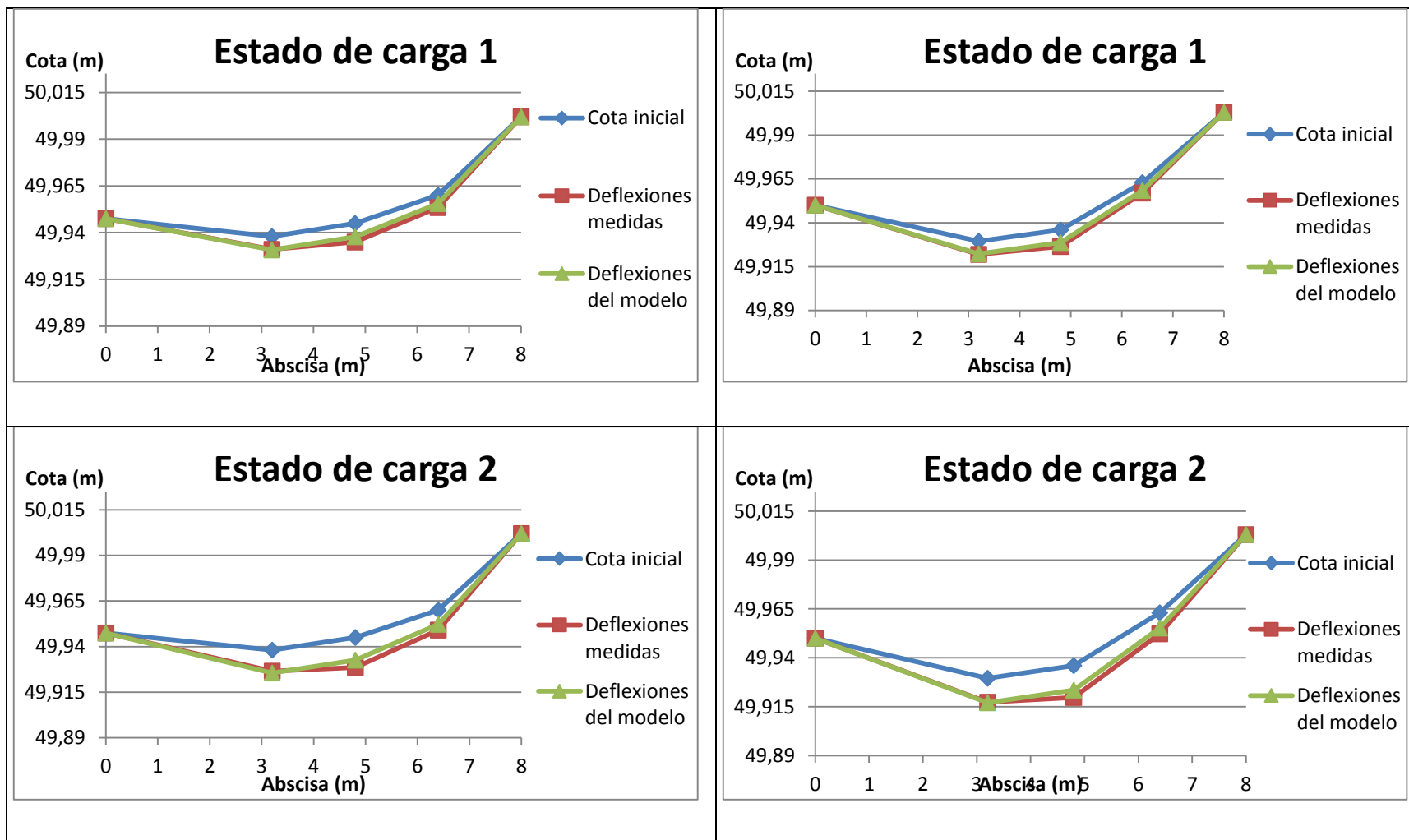
**Tabla 6.9 Diferencias de los datos medidos con el modelo numérico en el eje A**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (mm)	Estado de carga 2 (mm)	Estado de carga 3 (mm)	Estado de carga 4 (mm)
3,2	0,216	0,95	0,297	0,488
4,8	2,784	4,05	7,203	10,488

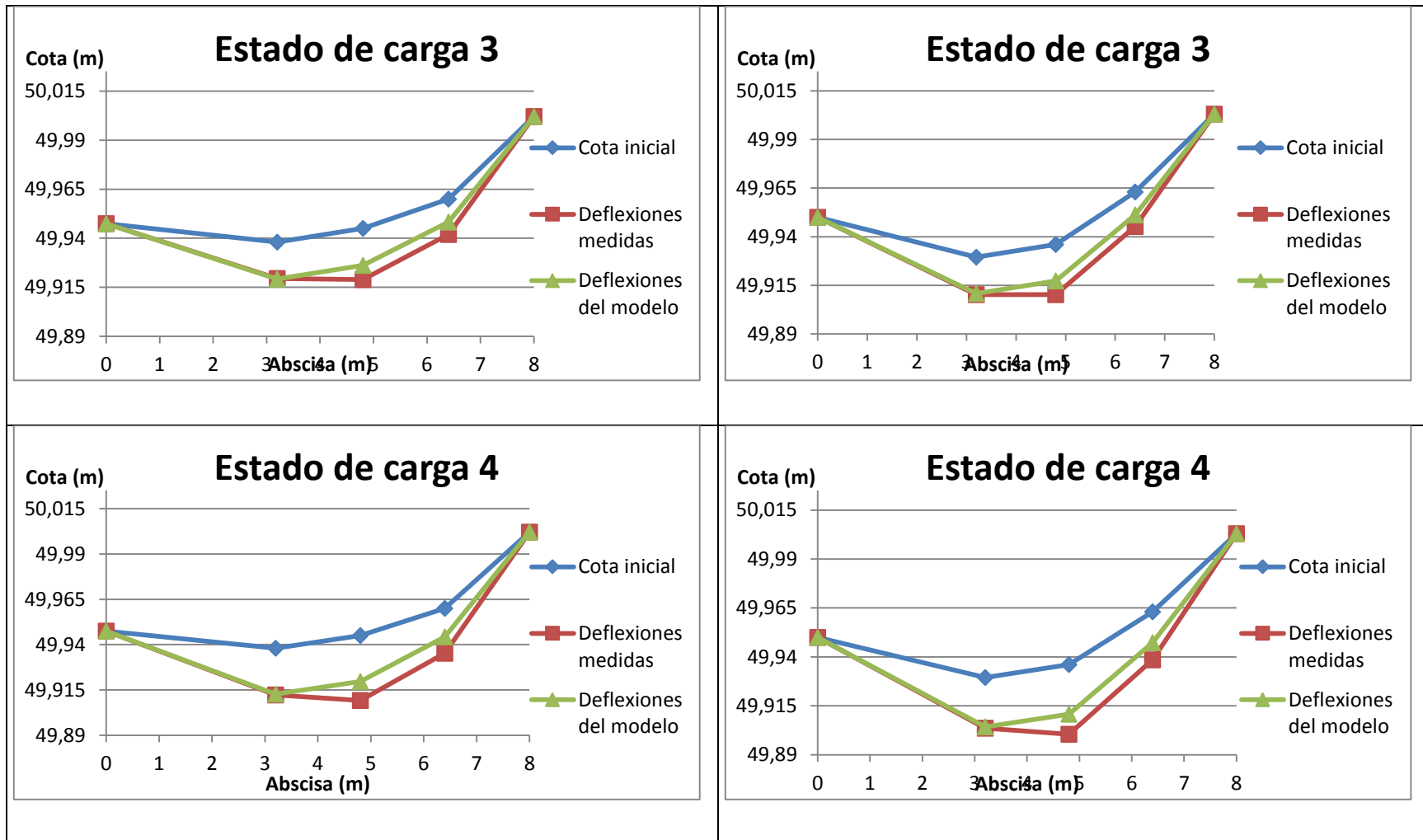
6,4	1,996	3,228	6,266	8,98
4	1,172	0,293	0,911	4,142

**Tabla 6.10 Diferencias de los datos medidos con el modelo numérico en el eje B**

Puntos del puente (m)	Estado de carga 1 (mm)	Estado de carga 2 (mm)	Estado de carga 3 (mm)	Estado de carga 4 (mm)
3,2	0,284	0,2	0,453	0,738
4,8	2,284	3,8	6,953	10,238
6,4	1,496	2,978	6,016	8,73
4	1,482	0,603	0,201	3,982







Para una viga simplemente apoyada, sometida a una carga distribuida es posible determinar la deflexión en cada punto de la viga de acuerdo con la ecuación ( 6.1).

$$y = \frac{wx}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3) \quad (6.1)$$

Conociendo las deflexiones es posible estimar la rigidez a flexión EI despejándola de la ecuación ( 6.1), obteniendo la ecuación ( 6.2).

$$EI = \frac{wx}{24y} (L^3 - 2Lx^2 + x^3) \quad (6.2)$$

De acuerdo con las deformaciones en cada uno de los puntos para las diferentes cargas, se calcula la rigidez a flexión EI que da muestra de la rigidez de la estructura y se comparan todos los resultados.

**Tabla 6.11 EI (kN·m<sup>2</sup>) calculada con datos topográficos**

Eje	Abscisa (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4	Estado de carga 5
A	3,2	7168,43	7528,41	7065,97	6822,26	6446,72
A	4,8	5017,90	5247,07	5027,71	4913,94	4592,76
A	6,4	4814,53	4908,55	4529,15	4426,65	4173,70
B	3,2	6690,53	7067,48	6790,68	6756,66	6388,12
B	4,8	5282,00	5327,80	5076,53	4948,54	4747,92
B	6,4	5215,74	5022,70	4592,94	4471,82	4213,83

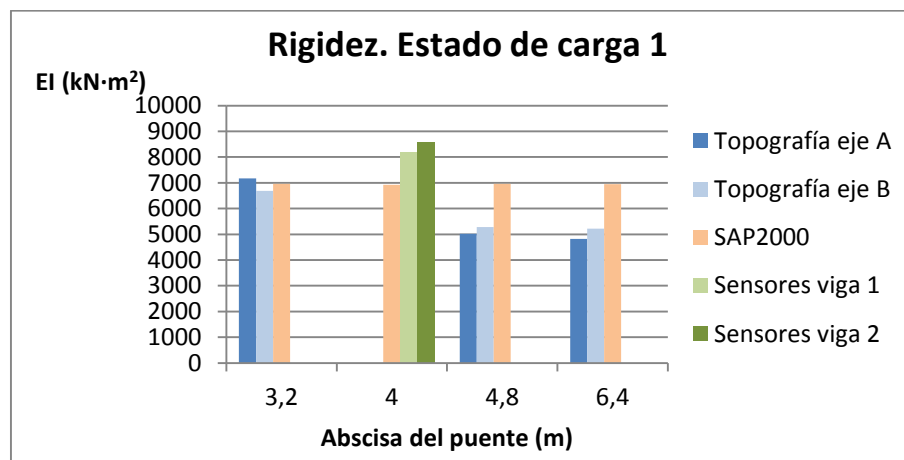
**Tabla 6.12 EI (kN·m<sup>2</sup>) calculada con datos de los sensores**

Viga	Abscisa (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4
1	4	8181,88	7080,32	6618,39	5991,19
2	4	8595,65	7255,49	6852,99	6022,48

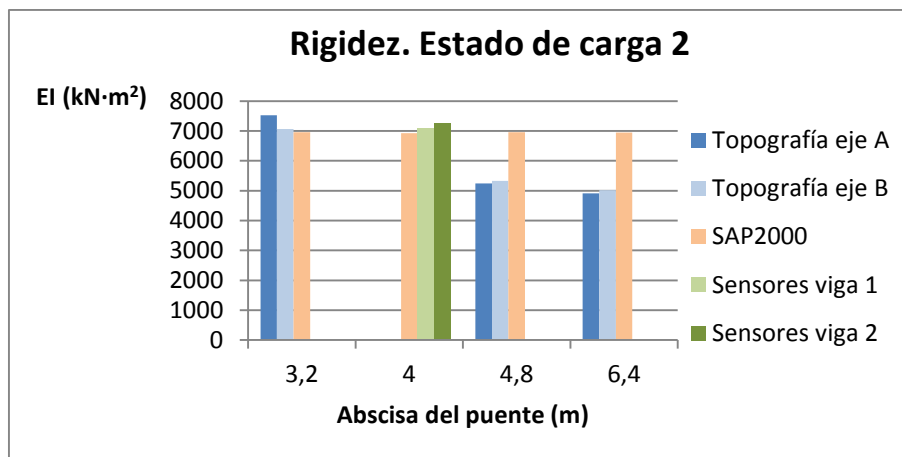
**Tabla 6.13 EI (kN·m<sup>2</sup>) calculada con datos del modelo numérico**

Abscisa (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4	Estado de carga 5
3,2	6953,85	6953,95	6954,33	6954,05	6954,05
4,8	6953,85	6953,95	6954,33	6954,05	6954,05
6,4	6948,14	6947,25	6947,73	6947,34	6947,34
4	6922,14	6922,36	6922,45	6922,42	6922,42

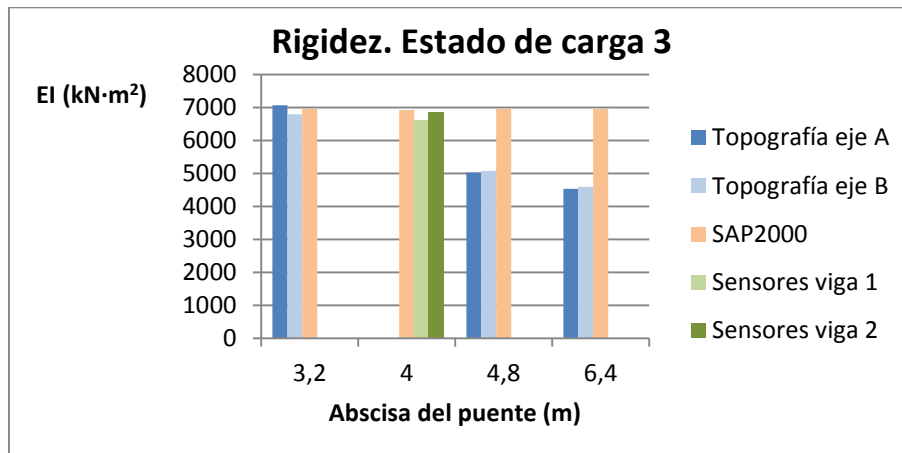
Estas comparaciones se muestran en las siguientes figuras.



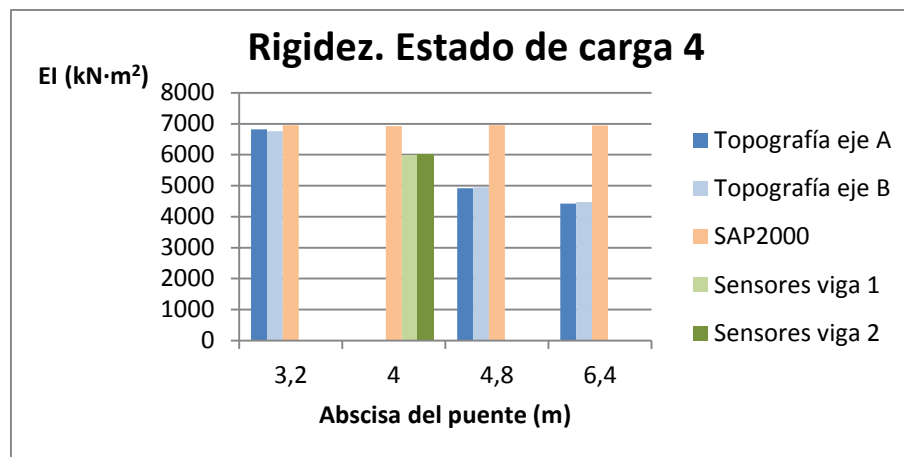
**Figura 6.4 Rigidez en Estado de carga 1**



**Figura 6.5 Rigidez en Estado de carga 2**



**Figura 6.6 Rigidez en Estado de carga 3**



**Figura 6.7 Rigidez en Estado de carga 4**

Como es posible observar de estas comparaciones los puntos 3,2 y 4 son los que más se asemejan al modelo numérico, las deformaciones en los puntos 3,2 y 4,8 deberían ser similares debido a la simetría sobre el centro de la luz y algunas deformaciones con topografía son mayores a las deformaciones en el centro con potenciómetros, lo que demuestra fuentes de error en algunas mediciones. Para los estados de carga 2, 3, 4 y 5 es posible establecer un valor aproximado de la rigidez del sistema.

### 6.3 ENSAYOS DE CARGA EN EL 2013

Para los ensayos de carga en el 2013 se utilizaron cinco contenedores de agua a lo largo del puente con el fin de lograr mayor facilidad en la carga distribuida a lo largo de este y un menor tiempo de llenado para disminuir las variaciones por temperatura, estos contenedores se muestran en la Figura 6.8. Se instalaron mayor cantidad de potenciómetros y de *strain gauges* que en relación a los primeros ensayos estos se muestran en la Tabla 6.14 la viga 1 es la que está más al sur.

De manera similar a los ensayos del 2011 se presentan los resultados para las pruebas de carga realizadas a los dos años siguientes.



**Figura 6.8 Ensayo de carga en el 2013**

**Tabla 6.14 Localización de los sensores para el ensayo de carga del 2013**

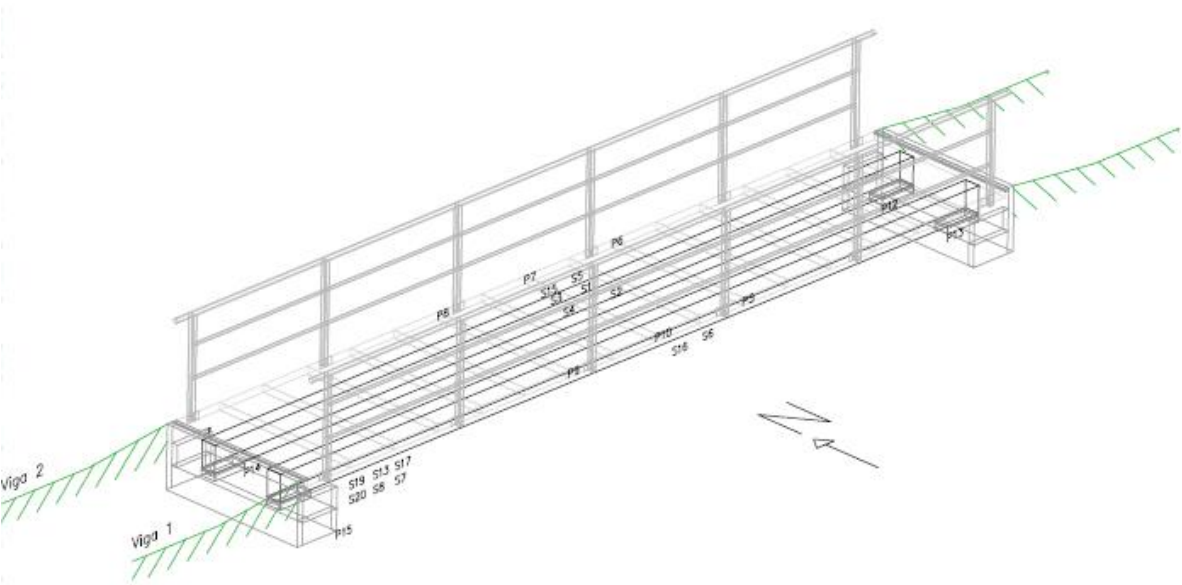
Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
P10	Central	Potenciómetro	Deflexión centro de la losa	Centro de la luz viga 1
P7	Central	Potenciómetro	Deflexión centro de la losa.	Centro de la luz viga 2
P6	Central	Potenciómetro	Deflexión de la losa	4,8 m de la viga 2
P8	Central	Potenciómetro	Deflexión de la losa	3,2 m de la viga 2
P11	Central	Potenciómetro	Deflexión de la losa	4,8 m de la viga 1
P9	Central	Potenciómetro	Deflexión de la losa	3,2 m de la viga 1
P15	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo occidental viga 1

Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
P13	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo oriental viga 1
P14	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo occidental viga 2
P12	Apoyo	Potenciómetro	Asentamiento de la viga en el apoyo	Apoyo oriental viga 2
S4	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al occidente de la junta central sobre la viga 1
S2	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al oriente de la junta central sobre la viga 1
S3	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al occidente de la junta central sobre la viga 2
S1	Central	Galga para concreto	Deformación en parte superior de la placa de concreto	Placa central al oriente de la junta central sobre la viga 2
S15	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 1
S16	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 2
S5	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 1
S6	Central	Galga para viga de carbono	Deformación axial en parte inferior la viga	Centro de la luz viga 2

Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
S17	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 90 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo occidental de la viga 1 a una distancia de 2 veces la altura de la viga desde el rigidizador interior
S13	Apoyo	Galga para concreto	Deformación en parte inferior de la placa de concreto para detectar deslizamiento en la interface placa-viga	Apoyo occidental de la viga 1
S8	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en parte superior de la viga de carbono para detectar deslizamiento en la interface placa-viga	Apoyo occidental de la viga 1
S7	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 0 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo occidental de la viga 1 a una distancia de 2 veces la altura de la viga desde el rigidizador interior



Sensor	Zona	Tipo de sensor	Función	Ubicación
S19	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 90 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo sur occidental de la viga 1 en el medio entre el rigidizador interior y el exterior
S20	Apoyo	Galga para viga de carbono	Deformación en el centro de la altura de la viga a una dirección de 0 grados con respecto a la horizontal para medir deformaciones de corte	Apoyo suroccidental de la viga 1 en el medio entre el rigidizador interior y el exterior



**Figura 6.9      Ubicación de los sensores ensayo del 2013**

Nota: La ilustración no está a escala

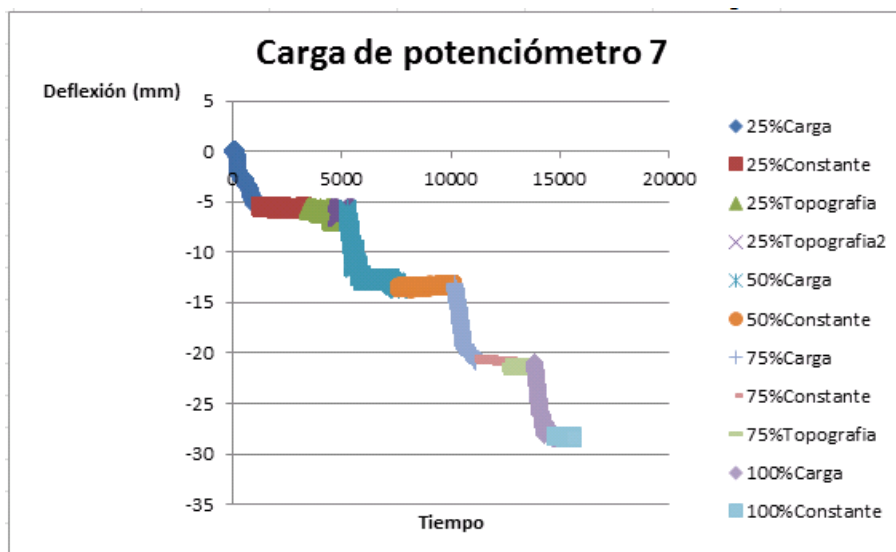
Las cargas impuestas a cada una de las vigas del puente se muestran en la Tabla 6.15.

**Tabla 6.15      Cargas impuestas por viga**

Estado de carga	Carga impuesta por viga (kN/m)
1	0,750
2	1,507
3	2,231
4	3,069

Para cada uno de estos ensayos se tomaron datos durante el tiempo de carga, un tiempo con la carga sostenida y mientras se tomaban los puntos con topografía sobre el puente; cada uno de estos pasos se pueden apreciar con las deformaciones de los sensores, a

manera de ejemplo se muestran los datos del potenciómetro 7, ubicado en el centro de la luz de la viga 2, en la Figura 6.10.



**Figura 6.10 Deflexiones del potenciómetro 7 durante las etapas de los ensayos**

En las siguientes tablas se muestran las deflexiones con los potenciómetros, con topografía y las dadas por el mismo modelo numérico con el que se compararon los ensayos de carga en el 2011, el cual posee las propiedades de diseño iniciales del puente.

**Tabla 6.16 Deflexiones con los potenciómetros**

Potenciómetro	Abscisa (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)
14	0	0,000213	0,000535	0,000861	0,001111
15	0	0,000172	0,000467	0,000729	0,000989
8	3,2	0,004743	0,011467	0,017808	0,024027
9	3,2	0,004455	0,01082	0,017118	0,023385
7	4	0,005659	0,013457	0,02075	0,028388
10	4	0,004866	0,011881	0,018375	0,025001
6	4,8	0,004601	0,011003	0,017128	0,020004
11	4,8	0,00608	0,013529	0,018234	0,021988

Potenci6metro	Abscisa (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)
12	8	0,017951	0,053059	0,080851	0,107179
13	8	0,000173	0,000471	0,000735	0,000966

Nota: El sensor 12 no estaba conectado y presenta datos incorrectos

**Tabla 6.17 Deflexiones con topografía**

Viga	Abscisa (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)
2	0	0,005	0,004	0,005	0,005
1	4	0,010	0,030	0,029	0,062
2	4	0,013	0,021	0,025	0,037
1	2,5	0,001	0,043	0,024	0,016
2	3,2	0,007	0,015	0,025	0,009
1	5,9	0,002	0,012	0,012	0,012

**Tabla 6.18 Deflexiones con el modelo numérico**

Abscisa (m)	Estado de carga 1 (m)	Estado de carga 2 (m)	Estado de carga 3 (m)	Estado de carga 4 (m)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2,47	0,004782	0,009613	0,014231	0,019571
3,2	0,005476	0,011009	0,016297	0,022412
4	0,005777	0,011613	0,017192	0,023643
4,8	0,005476	0,011009	0,016297	0,022412
5,9	0,004257	0,008558	0,012669	0,017423
6,4	0,003419	0,006872	0,010174	0,013991
8	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

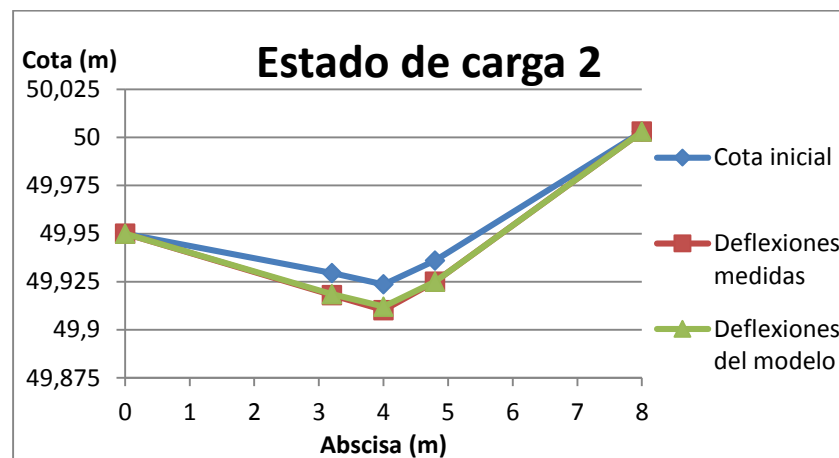
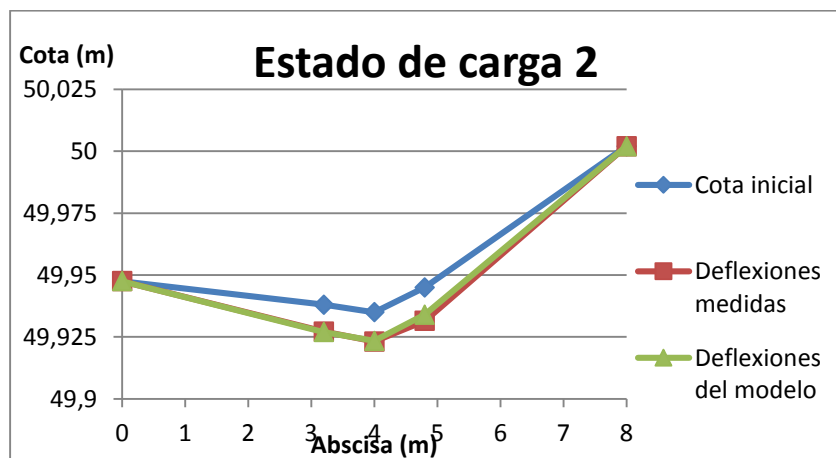
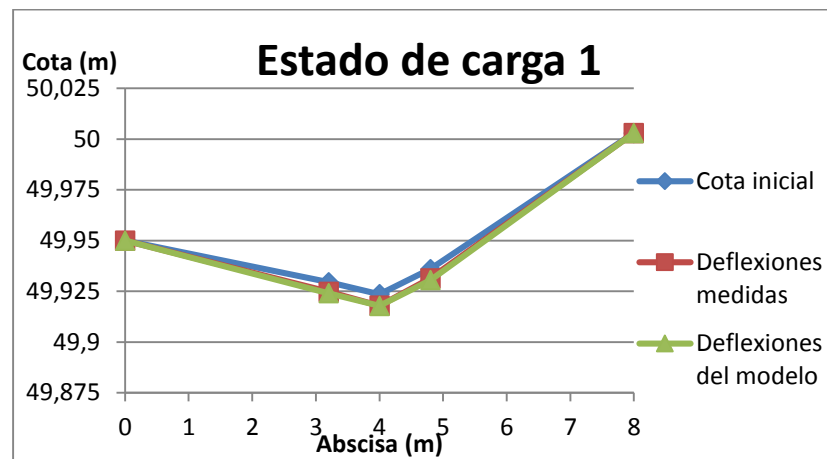
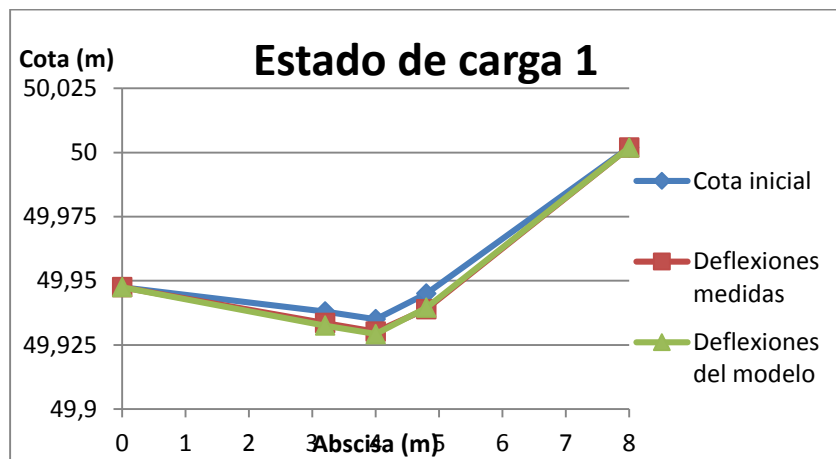
**Tabla 6.19 Diferencia deflexiones con topografía y el modelo numérico**

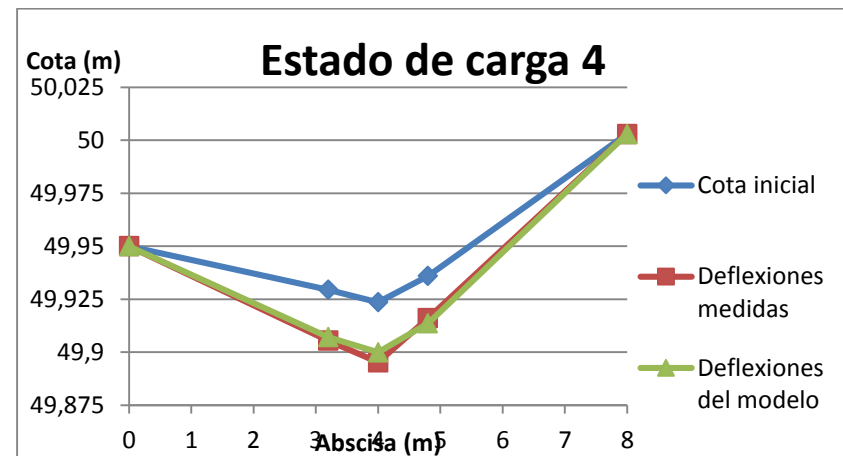
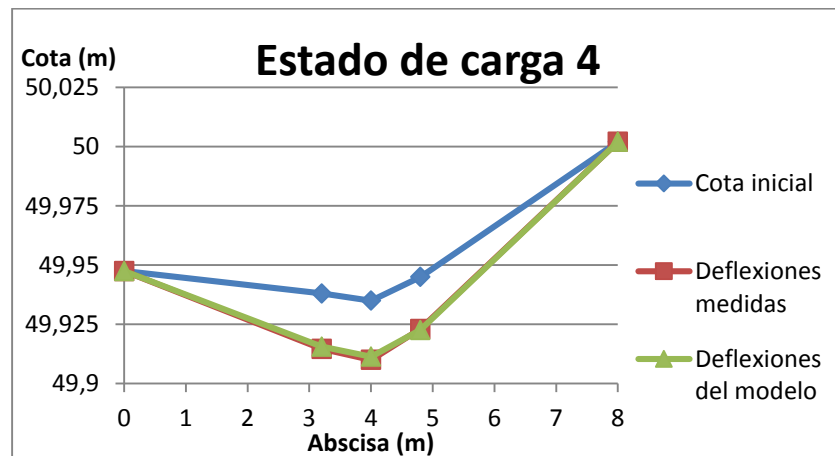
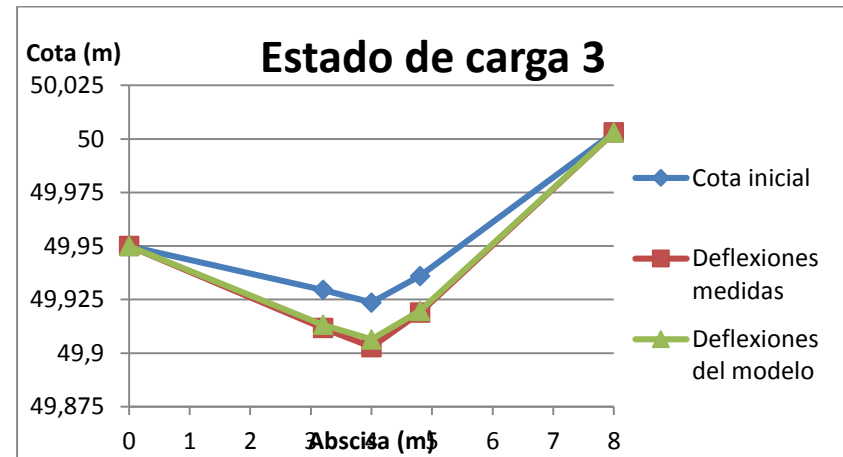
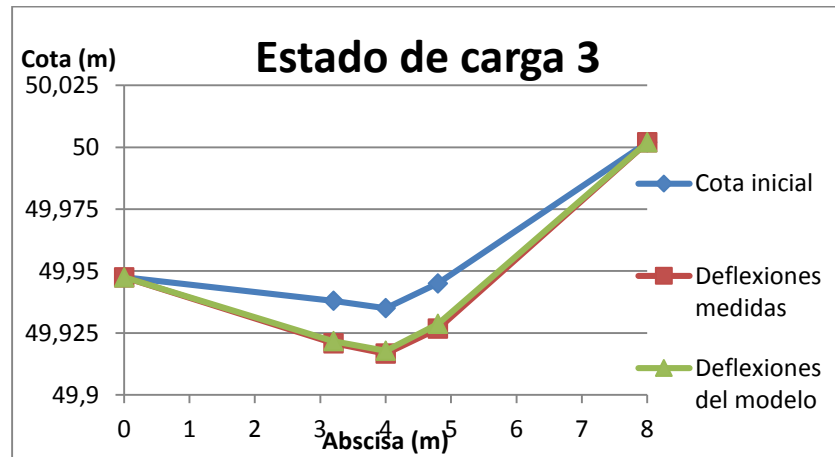
Viga	Abscisa (m)	Estado de carga 1 (mm)	Estado de carga 2 (mm)	Estado de carga 3 (mm)	Estado de carga 4 (mm)
1	4	4	18	12	38
2	4	7	9	8	13
1	3,2	4	33	10	4
2	3,2	2	4	9	13
1	4,8	2	3	1	5

**Tabla 6.20 Diferencia deflexiones con potenci6metros y el modelo numérico**

Potenci6metro	Abscisa (m)	Estado de carga 1 (mm)	Estado de carga 2 (mm)	Estado de carga 3 (mm)	Estado de carga 4 (mm)
8	3,2	0,733	0,458	1,511	1,615
9	3,2	1,021	0,189	0,821	0,973
7	4	0,118	1,844	3,558	4,745
10	4	0,911	0,268	1,183	1,358
6	4,8	0,875	0,006	0,831	2,408
11	4,8	0,604	2,52	1,937	0,424

Al analizar las deformaciones por estos tres m6todos es posible descartar las mediciones topogr6ficas ya que presentan grandes diferencias en algunos puntos respecto a los otros dos m6todos y es el procedimiento que tiene menor precisi6n. Por otra parte los resultados con los potenci6metros se asemejan en gran medida a los dados por el modelo numérico como se compara en las siguientes figuras, en donde la columna de la izquierda muestra la viga 1 y la derecha la 2. Se muestra en azul la cota inicial de referencia, en rojo las deformaciones con los potenci6metros y en verde las deformaciones con el modelo.





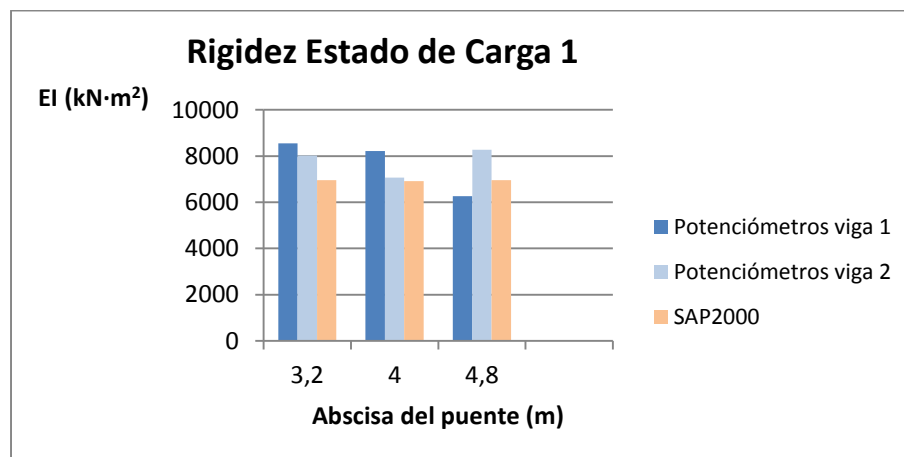
De acuerdo con las deformaciones en cada punto y la carga se calcula la rigidez de la viga, los resultados se muestran en las siguientes tablas y figuras.

**Tabla 6.21 Rigidez a flexión  $EI$  ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ) con los potenciómetros**

Viga	Abscisa (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4
1	3,2	8548,19	7075,35	6620,74	6664,97
1	4,8	6263,52	5658,61	6215,52	7088,42
1	4	8218,01	6766,11	6476,63	6546,29
2	3,2	8029,13	6676,14	6364,20	6486,88
2	4,8	8276,94	6957,67	6616,87	7791,45
2	4	7066,42	5973,71	5735,33	5765,24

**Tabla 6.22 Rigidez a flexión  $EI$  ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ) con el modelo**

Abscisa (m)	Estado de carga 1	Estado de carga 2	Estado de carga 3	Estado de carga 4
3,2	6954,38	6953,88	6954,27	6954,32
4,8	6954,38	6953,88	6954,27	6954,32
4	6922,08	6922,26	6922,29	6922,29



**Figura 6.11 Rigidez para estado de carga 1**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



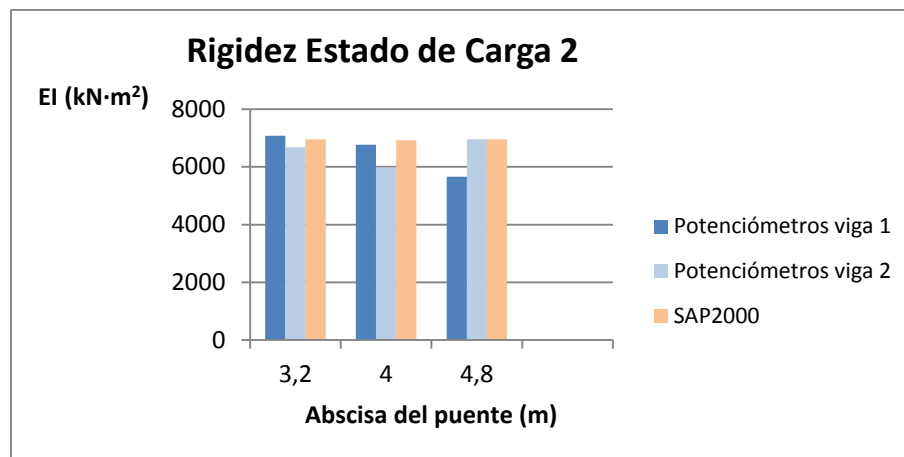


Figura 6.12 Rigidez para estado de carga 2

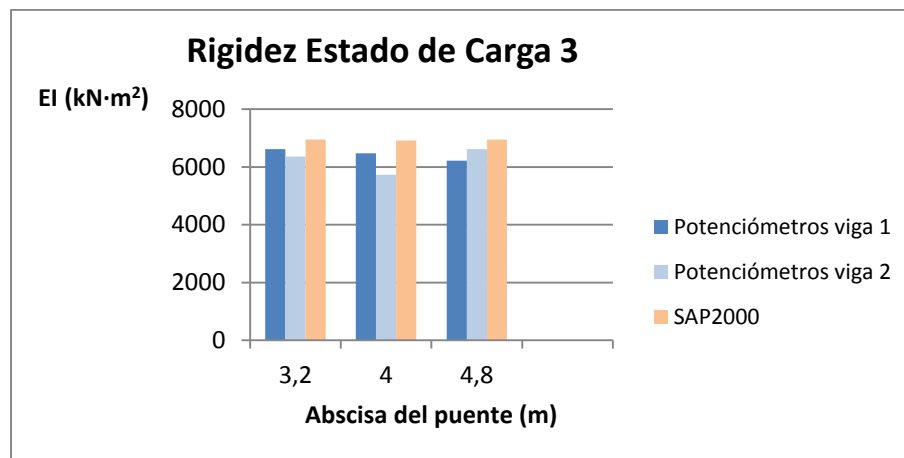
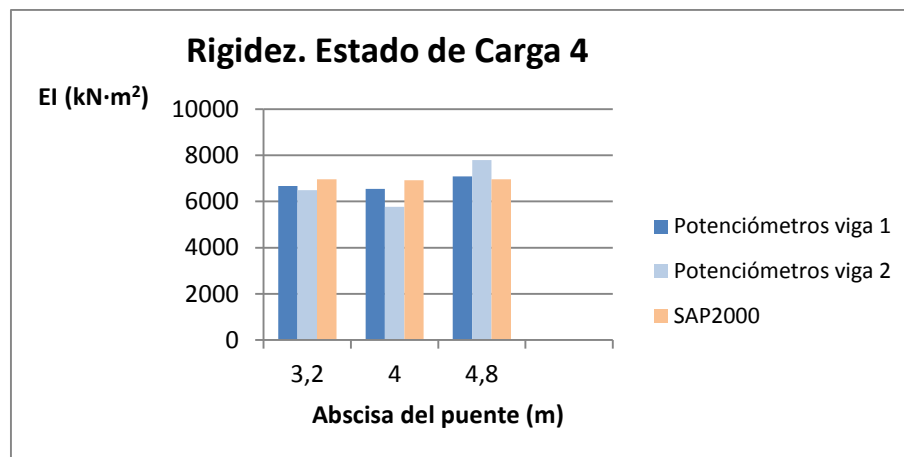
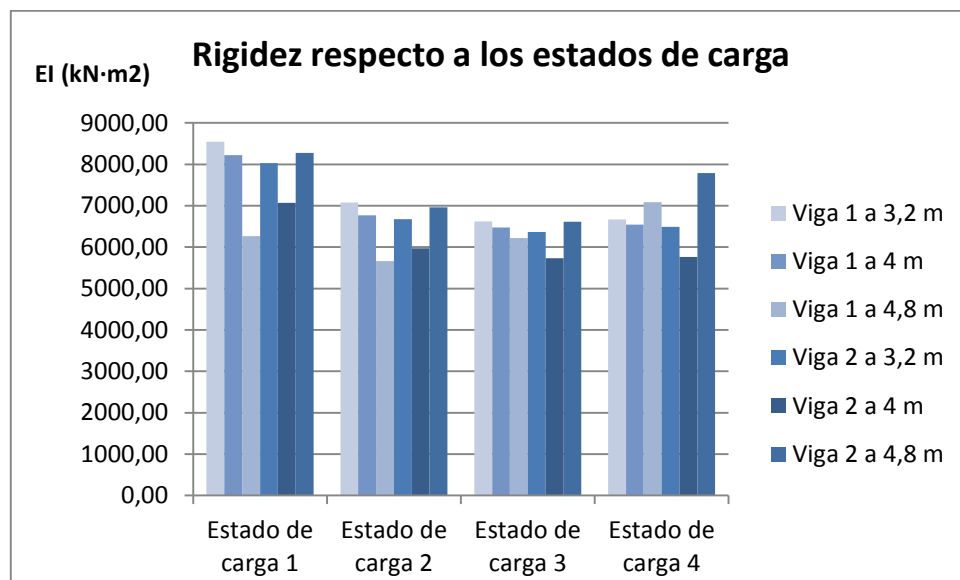


Figura 6.13 Rigidez para estado de carga 3



**Figura 6.14 Rigidez para estado de carga 4**

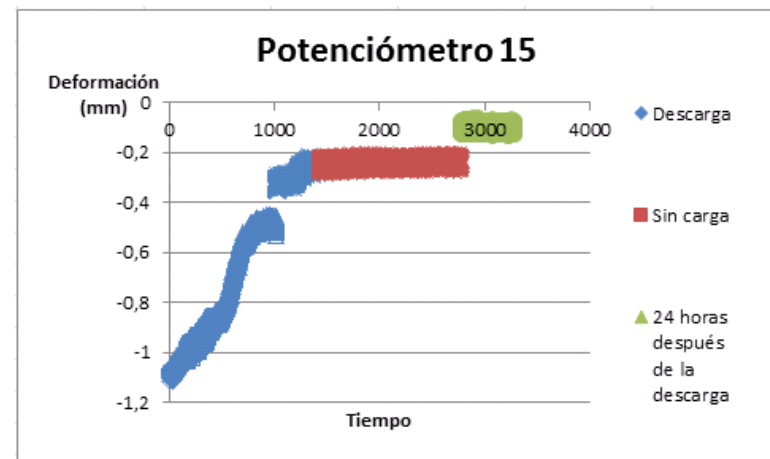
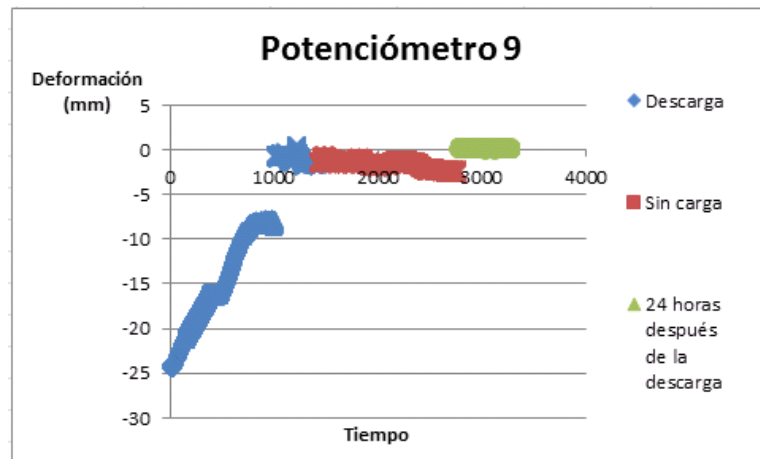
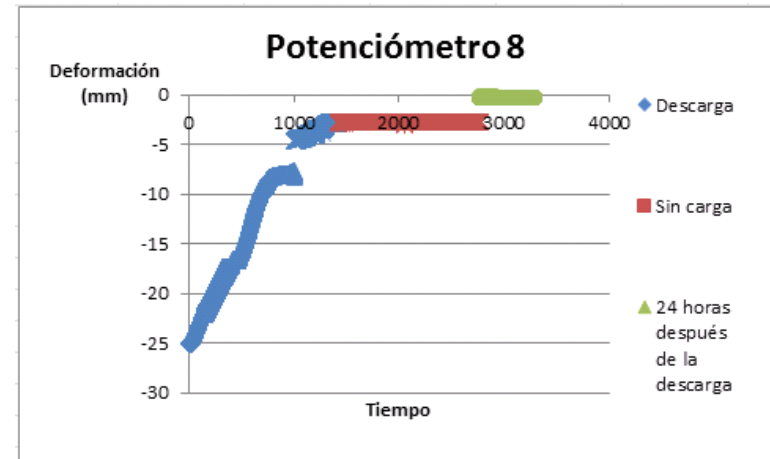
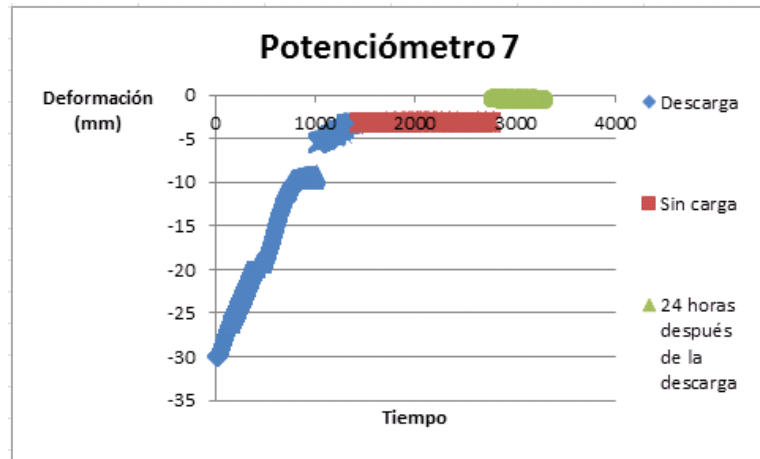
En la Figura 6.15 se muestra el comportamiento de la rigidez respecto a los cuatro estados de acuerdo con las deformaciones medidas por los potenci6metros a lo largo del puente, donde se aprecia que la rigidez calculada para el primer ensayo de carga es mayor a los dem6s estados de carga y a partir de este la rigidez se mantiene constante. El potenci6metro 11 ubicado en la abscisa 4,8 m de la viga 1, durante los dos primeros ensayos tiene algunos errores en la medici6n por el agua.



**Figura 6.15 Rigidez respecto a los estados de carga**

### **6.3.1 Descarga del puente**

Posterior al ensayo de carga, se mantiene el estado de carga durante 24 horas y se realiza el proceso de descarga de la estructura, posteriormente a las siguientes 24 horas se registran los datos de las deformaciones con los sensores. El proceso de descarga y sus etapas se muestran en las siguientes figuras para cuatro potenciómetros ubicados en el centro de la luz a 0,8 m de está y un apoyo, en estas gráficas es posible ver como se reducen las deformaciones conforme a la descarga, la tendencia de descarga presenta un brinco, posiblemente se deba a que no se capturaron registros con los sensores durante un tiempo mientras se iba retirando la carga. De igual manera es posible observar que a las 24 horas después de la descarga las deformaciones vuelven a cero, lo que indica que durante la carga se permaneció en el rango elástico del material. Los demás sensores mostraron comportamiento similar a estos.



## 6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 6.4.1 Comparación resultados de ensayos de carga

Se recopilan las gráficas de la rigidez a flexión calculada por los diferentes métodos en los dos ensayos de carga, comparando las abscisas comunes. De acuerdo con los resultados de ambos ensayos, para las abscisas 3,2 m y 4 m es posible encontrar un valor similar en la rigidez del puente. La abscisa 4,8 m presenta mayor variación en los cálculos de rigidez para los primeros ensayos de carga, donde las medidas de deformación se calcularon a partir de datos topográficos. Como se mencionó anteriormente las deformaciones en esta abscisa debieran ser similares a la abscisa en 3,2 m por simetría; por lo tanto hay una mayor dispersión y error en las medidas tomadas con topografía. De manera similar en los segundos ensayos los datos topográficos presentaban un mayor error y no se relacionaban con las deformaciones dadas por los potenciómetros ni con el modelo en algunos puntos, por lo tanto es preferible para este tipo de ensayos medir las deformaciones con potenciómetros en vez de topografía por el error en las mediciones.

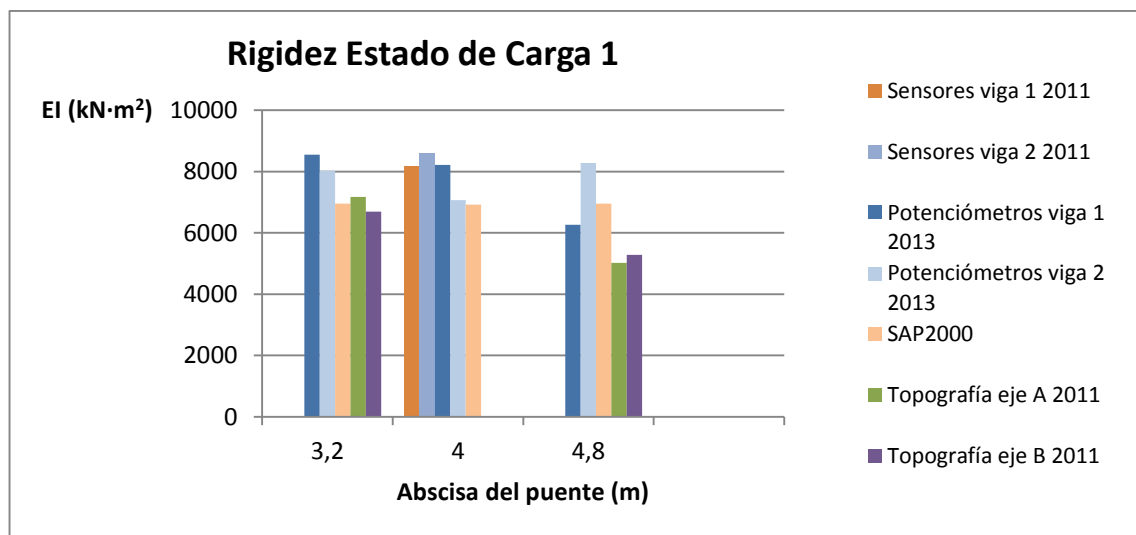
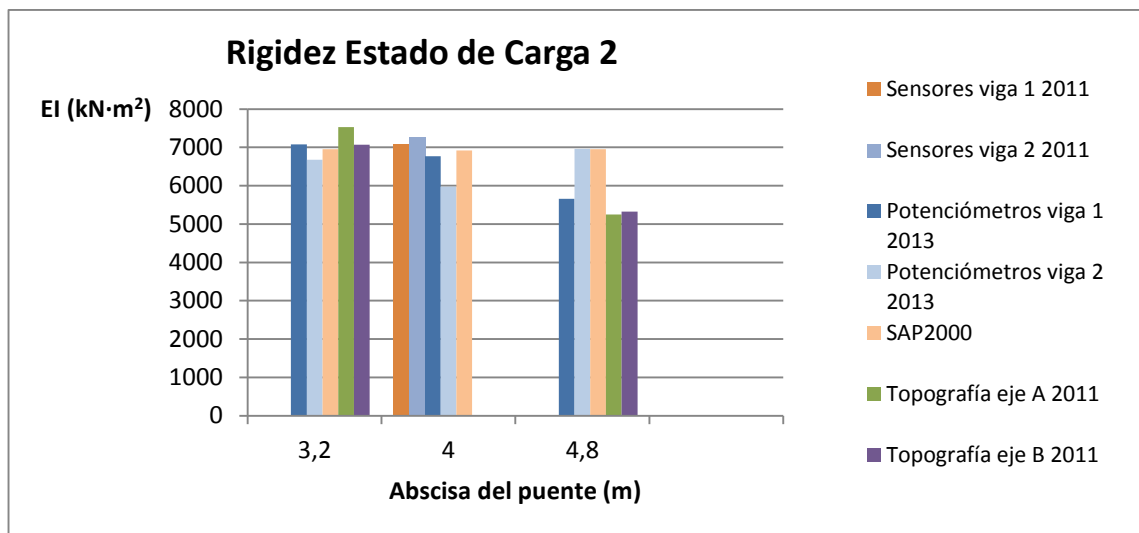
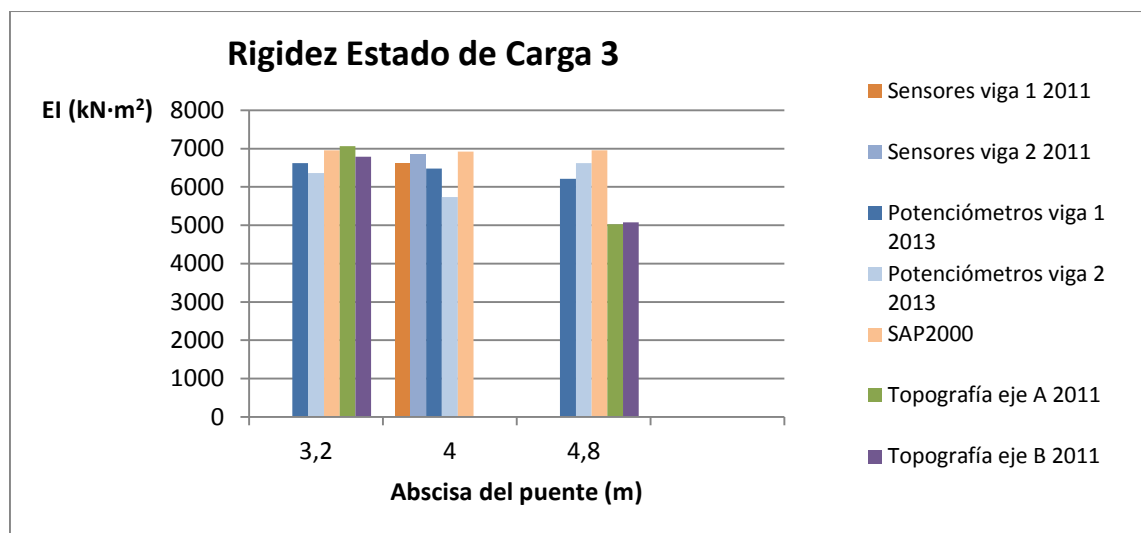


Figura 6.16 Comparación rigidez estado de carga 1



**Figura 6.17 Comparación rigidez estado de carga 2**



**Figura 6.18 Comparación rigidez estado de carga 3**

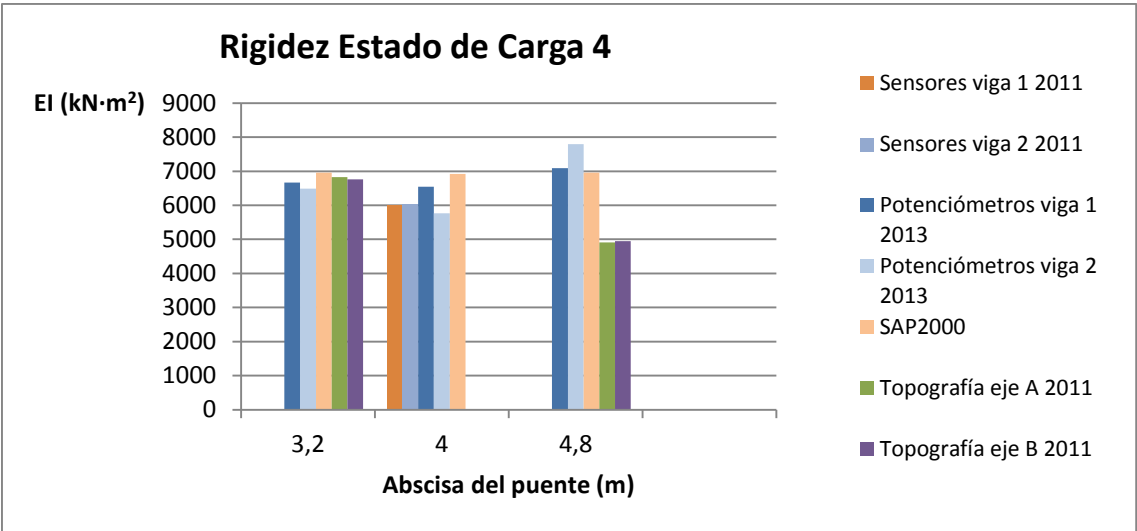


Figura 6.19 Comparaci6n rigidez estado de carga 4

6.4.2 An6lisis de la rigidez de dise1o y la calculada por los ensayos

Tomando los promedios de la rigidez de todos los ensayos calculados en la secci6n anterior, excluyendo el calculado con los datos topogr6ficos para la abscisa 4, 8 m, se estima un valor promedio de la rigidez de una viga del puente para los dos ensayos y se comparan con el valor de la rigidez del modelo num6rico en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23 Rigidez a flexi6n EI estimada

M6todo	EI (kN·m²)	Diferencia (%)
Modelo num6rico SAP 2000	6944,10	Referencia
Ensayos de carga 2011	6980,18	0,5%
Ensayos de carga 2013	6828,43	1,7%
Ensayos de vibraciones 2013	6464,6	6,9%

El porcentaje de variaci6n entre los ensayos del 2011 y 2013 es del 2,17 %, esta diferencia se puede deber a la diferencia de procedimientos en los ensayos, a un error propio de las mediciones o ligeros cambios en las propiedades del puente. Ambos ensayos se asemejan al mismo modelo num6rico el cual tiene como base las propiedades del puente del dise1o, por lo tanto es posible describir la rigidez y el comportamiento del puente en los dos

primeros años después de su construcción con el mismo modelo y parece no haber variación significativa en las propiedades del puente a lo largo de este tiempo.

La variación entre los ensayos de carga y los ensayos de vibración se puede deber a las aproximaciones en el cálculo de la masa de la estructura y a que en el procesamiento de los datos de los ensayos de vibración se realizan filtros que pueden variar el valor de la frecuencia del puente y por lo tanto de su rigidez.

En el modelo numérico no se consideró el efecto de las barandas en la rigidez del puente y no se cree que aporten rigidez significativa al sistema ya que el modelo tiene mayor rigidez que los otros ensayos empleados, a pesar de esto, es posible profundizar sobre el efecto de estas en el puente haciendo ensayos con y sin barandas, analizando si le aportan mayor rigidez a la estructura al generar un efecto de una viga más alta y es una de las causas de la diferencia entre la rigidez del modelo y los ensayos o si por el contrario, durante una cierta carga tienen un efecto de pandeo y no le aportan rigidez al sistema.

Para el control de las deflexiones en el diseño del puente, se calculó el momento de inercia de la sección de la viga transformada en el laminado L1, tomando como módulo de elasticidad el  $E_x$  del material ortotrópico equivalente calculado de este laminado. Estos valores de diseño, mostrados en la Tabla 6.24, fueron suministrados por Constructora Conconcreto S. A. y no fueron calculados en este trabajo.

**Tabla 6.24 Valores de rigidez del diseño**

E (kPa)	I (m <sup>4</sup> )	EI (kN·m <sup>2</sup> )
64430000	0,00014511	9349,437

(Davila, 2010)

De manera similar los valores de la rigidez a flexión del modelo numérico creado en este trabajo se muestran en la Tabla 6.25.

**Tabla 6.25 Valores de rigidez del modelo numérico**

E (kPa)	I (m <sup>4</sup> )	EI (kN·m <sup>2</sup> )
64505000	0,00010765	6944,10



Comparando los valores de rigidez de los dos ensayos, del modelo numérico y del diseño, el modelo numérico es más representativo que la rigidez utilizada durante el diseño. Es necesario ajustar el momento de inercia del diseño de manera que las deformaciones se asemejen más al comportamiento real de la estructura exhibida durante los ensayos de carga. Además, se recomienda la construcción de un modelo numérico del puente en la etapa de diseño para la verificación de las deformaciones.

### **6.4.3 Cambios en la estructura**

Las propiedades mecánicas y estructurales del puente no han variado significativamente durante los primeros dos años de exposición, sin embargo, se han presentado cambios en algunas zonas durante este tiempo como oxidación de las barandas por la intemperie y pérdida del recubrimiento de la losa en el centro de la luz cercana a la viga 1, estos efectos se muestran en la Figura 6.20 y Figura 6.21 respectivamente.



**Figura 6.20 Oxidación de las barandas**



**Figura 6.21 Pérdida del recubrimiento en el centro de la losa**

## 7 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Al comparar los resultados proporcionados por los ensayos de carga realizados en el momento de la construcción del puente, y los ensayos de carga y vibración dos años después, no se evidencia una degradación significativa en las propiedades mecánicas del puente por causa de la exposición ambiental durante este tiempo. Este resultado indica que el sistema de secciones con materiales compuestos utilizado en el puente peatonal de la Escuela de Ingeniería de Antioquia presenta durabilidad y estabilidad de sus propiedades por este tiempo.

La rigidez calculada a partir de las deflexiones de los ensayos de carga elaborados en los años 2011 y 2013 y los ensayos de vibraciones tiene errores del 0,5 %, 1,7 % y 6,9 % con respecto al modelo numérico, creado con base en la geometría y propiedades de los materiales. De esta manera, con estos métodos, se estima la rigidez del puente durante este tiempo.

El modelo numérico definido arrojó resultados similares a los experimentales. Esto indica que la formulación teórica utilizada para la estimación de las propiedades de los componentes del puente logra representar con precisión el comportamiento del puente. Además, debido a la poca variación de las propiedades en el tiempo, no fue necesario calibrar el modelo original para considerar variaciones en las propiedades de los materiales.

Teniendo como base las deformaciones medidas durante los ensayos de carga y la rigidez del puente calculada a partir de estos, la rigidez del puente tomada durante el diseño difiere en un 26 %, esta diferencia radica en el momento de inercia de la sección transformada de la sección compuesta de la viga y la losa. Por lo que es conveniente ajustar la rigidez del puente del diseño con el comportamiento real de la estructura y construir un modelo numérico del puente en el momento del diseño con el fin de verificar deformaciones.

Se hace necesario continuar con el monitoreo del puente realizando futuros ensayos de carga y de vibraciones con el fin de evaluar el comportamiento y las propiedades del puente ante un mayor tiempo de exposición y verificar la viabilidad del sistema estructural.

Para la medición de las deflexiones durante ensayos de carga de este puente, es recomendable utilizar potenciómetros y galgas extensiométricas en lugar de las mediciones topográficas, ya que estas últimas presentan mayor error en las medidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acciona. (2008). *Design of FRP Composite Transport Infrastructures*. Warsaw.
- Acciona. (24 de 12 de 2010). *Acciona*. Recuperado el 29 de 07 de 2013, de <http://www.acciona.com/pressroom/indepth/2010/model-walkways>
- Acevedo Pino, C. E., & Barrientos Correa, R. I. (2008). *Uso de materiales compuestos en la construcción*. Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Barbero, E. (2010). *Introduction to Composite Materials Design*. CRC Press.
- Barbero, E. J. (s.f.). [www.mae.wvu.edu/barbero/icmd/](http://www.mae.wvu.edu/barbero/icmd/).
- Burgueño, R., Karbhari, V., Seible, F., & Kolozs, R. (2001). *Experimental dynamic characterization of an FRP composite bridge superstructure assembly*. San Diego.
- Cantuta Peralta, I. (2011). *Modelización numérica del comportamiento frente a impacto en vigas de sección cajón de fibra de carbono*. Leganés.
- Chopra, A. (s.f.). *Dynamics of Structures, Theory and Applicationsto Earthquake Engineering*. Berkeley: Prentice Hall.
- Creese, R. (2004). *Polymer Composites III*.
- Cristina Barris, L. T. (2012). *Design of FRP Reinforced Concrete Beams for Serviceability Requirements*. Journal of Civil Engineering and Management.
- Davila, J. (2010). *EIA Footbridge Design Hybrid FRP-Concrete System*. Bogotá: Gerencia técnica Conconcreto S. A. .
- Duque Uribe, M. D. (2013). *Diseño y construcción de puentes*. Envigado: EIA.
- Fleck, S., & Kuzy, G. (2012). *Bridge in a backpack: Saving the nation's bridges one backpack at a time*.
- Flynn, S. K. (2013). *A Tale of Two Bridges: How FRP bridge decks solved a pair of construction challenges*.

- García Reyes, L. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá.
- Gibson, R. (2007). *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press.
- Government Engineering. (2005). *A Hybrid FRP Bridge System for Texas*.
- Grupo de Estructuras y Construcción . (2013). *Monitoreo del comportamiento del puente en materiales compuestos de la sede de la EIA - Etapa 2*. Envigado.
- Grupo de Estructuras y Construcción. (2011). *Reporte de ensayos de carga del puente en materiales compuestos de la sede de la EIA*. Envigado.
- Guerra, Á. C., Sánchez, M., & Reyes, J. C. (2006). *Análisis probabilístico del comportamiento dinámico de estructuras*. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.
- Herwig, A. (2012). Design of FRP-Profiles and All-FRP-Structures.
- Hibbeler, R. (s.f.). *Mecánica de materiales*. Person Prentice Hall.
- HP FUTURE-Bridge. (2008). Introduction to the HP FUTURE-Bridge project. Warszawa.
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja . (s.f.). *Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes*. Madrid.
- Kendall, D. (2006). *Large span FRP composite bridges*.
- Khalifa, M., Hodhod, O., & Zaki, M. (1995). *Analysis and design methodology for an FRP cable stayed pedestrian bridge*. Lincoln.
- Kluft, C. (2011). *Feasibility of Construction a Fiber Reinforced Polymer Composite Bridge*. University of New South Wales at Australian Defence Force Academy.
- Manalo, A., Aravinthan, T., & Karunasena, W. (2010). *Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams*. Toowoomba: Centre of Excellence in Engineered Fibre Composites (CEEFC).
- Meier, U. (2011). *Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables for Suspension Bridges: Why? Why Not? What If?*

- Mieres, J. M., Viñolo, A., Pineda, L., López, D., & Botello, F. (2004). *Primer puente carretero fabricado en España en materiales poliméricos reforzados con fibras*. Madrid.
- Mieres, J., Miravete, A., & Gutiérrez, E. (2006). *Descripción de paso superior vehicular de la Autovía del Cantábrico realizado con materiales compuestos*.
- Miravete, A. (2001). *Hacia la fibra de carbono en la construcción*. Zaragoza.
- Ocampo, R. A. (2010). *Predicción de vida útil de puentes reforzados con FRP sujetos a esfuerzos de fatiga*. Santiago de Chile.
- Parrilla Calle, P. (2011). *Análisis teórico experimental de pilares y vigas de hormigón armado reforzados con fibra de carbono*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Plymouth. (s.f.). *Plymouth*. Recuperado el 11 de Agosto de 2013, de <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm>
- Potyrala, P. (2011). *Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures*. Barcelona.
- Regás, F. J. (2013). *Concreto GFRC*. Medellín.
- Reitmann, B. (2007). San Patricio Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bridge. *Design and Bridge Conference*. Texas Department of Transportation.
- Rodríguez López, B. (2012). *Puentes de plástico*.
- Ryszard, D. A. (2003). Environmental considerations to structural material selection for a bridge. *European Bridge Engineering Conference*.
- Sasaki, I., & Nishizaki, I. (2010). *Load-Bearing of an FRP Bridge after Nine Years of Exposure*. Ibaraki.
- Smith, W. F. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mc Graw Hill.
- Tuakta, C. (2004). *Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures*. Cambridge.

Wang, X., & Wu, Z. (2010). *Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long span cable stayed bridges*.

Wight, J., & MacGregor, J. (s.f.). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Pearson.

Xiong, W., Cai, C., Zhang, Y., & Xiao, R. (2011). *Study of super long span cable stayed bridges with CFRP components*.

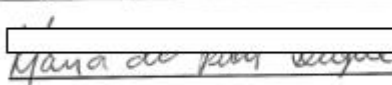


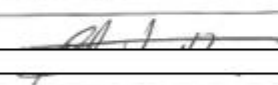


ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL  
DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	20/11/2013						
Nombre del proyecto:	Evaluación del comportamiento en el largo plazo de un puente construido con secciones con materiales compuestos						
Director del proyecto:	Carlos Andrés Blandón Uribe						
<table border="1"><tr><td>Nombre del estudiante</td><td>Programa académico</td></tr><tr><td>Mauricio Restrepo</td><td>Ingeniería Civil</td></tr><tr><td> </td><td> </td></tr></table>	Nombre del estudiante	Programa académico	Mauricio Restrepo	Ingeniería Civil			
Nombre del estudiante	Programa académico						
Mauricio Restrepo	Ingeniería Civil						
Nombre del Jurado:							
Evaluación del proyecto:							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado							
Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							

  
Mariana de la Cruz  
Director del Programa

  
Carlos Andrés Blandón Uribe  
Director del Trabajo de Grado